

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marcelo Rak

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Damir Dović, dipl. ing.

Student:

Marcelo Rak

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svome mentoru Prof.dr.sc. Damiru Doviću na savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada, kao i obitelji i prijateljima na podršci tijekom dosadašnjeg studiranja.

Marcelo Rak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Marcelo Rak

Mat. br.: 0035197058

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Konstrukcija vodom hlađenog kondenzatora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design of water cooled condenser**

Opis zadatka:

Potrebno je konstruirati vodom hlađeni kondenzator slijedećih karakteristika:

- toplinski učin: 300 kW
- radna tvar: R290
- temperatura kondenzacije: 40°C
- ulazna/izlazna temperatura vode: 28°C/33°C

Potrebno je provesti i izraditi:

- analizu izraza za prijelaz topline i pad tlaka kod kondenzacije u shell&tube i pločastim izmjenjivačima topline
- termodinamički proračun potrebne površine izmjene topline za oba tipa izmjenjivača
- izračun pogonskih i investicijskih troškova za oba tipa izmjenjivača
- potrebne proračune čvrstoće shell&tube izmjenjivača
- sklopni i radioničke crteže shell&tube izmjenjivača
- tehničku dokumentaciju

Potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

- 1. rok: 23. veljače 2018.
- 2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
- 3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
- 2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
- 3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Dović

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	VII
POPIS OZNAKA	VIII
POPIS INDEKSA	XI
SAŽETAK.....	XIV
SUMMARY	XV
1. UVOD.....	1
2. ULAZNI PODATCI.....	3
2.1. Fizikalna svojstva propana.....	3
2.1.1. Fizikalna svojstva kapljevine propana	3
2.1.2. Fizikalna svojstva pare propana.....	4
2.2. Fizikalna svojstva rashladne vode.....	4
2.3. Srednja logaritamska temperaturna razlika.....	5
3. KONDENZACIJA U SHELL&TUBE IZMJENJIVAČIMA	6
3.1. Općenito o Shell&Tube izmjenjivačima.....	6
3.2. Kondenzacija na cijevima	6
3.2.1. Laminarna kondenzacija na cijevima.....	6
3.2.2. Vrste strujanja	8
3.2.3. Mape strujanja.....	8
3.2.4. Laminarna kondenzacija na snopu cijevi	10
3.2.5. Usporedba izraza za izmjenu topline	11
3.2.6. Turbulentna kondenzacija na cijevima	12
3.3. Kondenzacija u horizontalnim cijevima	12
3.3.1. Vrste strujanja	13
3.3.2. Mape strujanja.....	15
3.3.3. Izrazi za izmjenu topline.....	19
3.3.4. Usporedba izraza za izmjenu topline	26
3.4. Pad tlaka u horizontalnim cijevima.....	28
3.4.1. Fanningov faktor otpora.....	29
3.4.2. Homogeni model.....	30
3.4.3. Heterogeni model.....	30
3.4.4. Usporedba izraza za pad tlaka.....	32

4. KONSTRUIRANJE SHELL&TUBE KONDENZATORA	34
4.1. Termodinamički proračun.....	34
4.1.1. Odabir cijevi izmjenjivača	34
4.1.2. Potrebna broj cijevi	34
4.1.3. Koeficijent prijelaza topline na strani rashladne vode.....	35
4.1.4. Koeficijent prijelaza topline s vanjske strane stijenke.....	38
4.1.5. Potrebna površina izmjene topline i ukupna duljina izmjenjivača	40
4.2. Maseni i volumni protoci medija	41
4.2.1. Maseni i volumni protok pare radne tvari.....	41
4.2.2. Maseni i volumni protoci kondenzata radne tvari.....	41
4.2.3. Maseni i volumni protok rashladne vode.....	41
4.3. Dimenzioniranje priključaka.....	42
4.3.1. Dimenzioniranje priključka za dovod pare radne tvari.....	42
4.3.2. Dimenzioniranje priključka za odvod kondenzata radne tvari.....	42
4.3.3. Dimenzioniranje priključka za dovod/odvod rashladne vode.....	43
4.3.4. Dimenzioniranje priključka sigurnosnog ventila	44
4.4. Proračun čvrstoće	46
4.4.1. Ulazni podatci	46
4.4.2. Odabrani materijal	46
4.4.3. Proračun cilindričnog plašta izloženog djelovanju unutrašnjeg tlaka prema normi M.E2.253.....	47
4.4.4. Proračun izreza u plaštu izloženog djelovanju unutrašnjeg tlaka prema normi M.E2.256.....	48
4.4.5. Proračun podnice bez izreza izvrgnute unutrašnjem tlaku prema normi M.E2.252.....	51
4.4.6. Proračun podnice s izrezima izvrgnute djelovanju unutrašnjeg tlaka prema normi M.E2.256.....	56
4.4.7. Proračun vijaka prema normi M.E2.257.....	58
4.4.8. Proračun ravne priрубnice prema normi M.E2.258.	62
4.4.9. Proračun cijevne stijenke prema normi M.E2.259.....	63
4.4.10. Minimalna širina zavara.....	65
4.5. Hidraulički proračun	65
4.5.1. Pad tlaka na strani rashladne vode	65
4.5.2. Pad tlaka na strani radne tvari	67
4.5.3. Ukupan pad tlaka na izmjenjivaču.....	70
4.6. Određivanje klase posude pod tlakom	70
4.6.1. Volumen izmjenjivača na strani radne tvari	70
4.6.2. Volumen aparata na strani rashladne vode	73
4.6.3. Određivanje kategorije opreme pod tlakom.....	75
4.6.4. Kategorija izmjenjivača topline	77
4.7. Tehnički opis izmjenjivača	77
4.7.1. Konstrukcija izmjenjivača.....	78
4.7.2. Upotrebljeni materijali	78
5. KONDENZACIJA U PLOČASTIM IZMJENJIVAČIMA.....	80
5.1. Općenito o pločastim izmjenjivačima.....	80
5.2. Geometrija lamele	80
5.3. Izrazi za izmjenu topline	82
5.3.1. Yan et al. (1999)	82
5.3.2. Palmer et al. (2000).....	83

5.3.3.	Thonon & Bontemps (2002)	83
5.3.4.	Han et al. (2003)	84
5.3.5.	Wurfel & Ostrowski (2004)	84
5.3.6.	Usporedba izraza za izmjenu topline	85
5.4.	Pad tlaka	87
5.4.1.	Yan et al. (1999)	87
5.4.2.	Lee et al. (1999)	87
5.4.3.	Han et al. (2003)	87
5.4.4.	Usporedba izraza za pad tlaka.....	88
6.	DIMENZIONIRANJE PLOČASTOG IZMJENJIVAČA	89
6.1.	Termodinamički proračun.....	89
6.1.1.	Koeficijent prijelaza topline na strani rashladne vode	89
6.1.2.	Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari i efektivna visina lamele.....	91
6.1.3.	Površina izmjene topline	94
6.2.	Hidraulički proračun	95
6.2.1.	Pad tlaka na strani rashladne vode	95
6.2.2.	Pad tlaka na strani radne tvari	96
6.2.3.	Ukupan pad tlaka na izmjenjivaču	98
7.	FINANCIJSKA ANALIZA	99
7.1.	Investicijski troškovi	99
7.2.	Pogonski troškovi.....	99
7.2.1.	Potrebna snaga za pogon pumpe kod Shell&Tube izmjenjivača.....	100
7.2.2.	Potrebna snaga za pogon pumpe kod pločastog izmjenjivača	100
7.2.3.	Ukupni pogonski troškovi na godišnjoj razini	100
7.3.	Usporedba ukupnog troška kroz vremenski period.....	101
8.	ZAKLJUČAK.....	102

POPIS SLIKA

Slika 1. Filmska i kapljičasta kondenzacija	1
Slika 2. Temperaturni profil na kondenzatoru	2
Slika 3. Shell&Tube izmjenjivač topline	6
Slika 4. Laminarna filmska kondenzacija na cijevima.....	7
Slika 5. Vrste strujanja kod laminarne kondenzacije na cijevima.....	9
Slika 6. Hu & Jacobi (1996) mapa strujanja za laminarnu kondenzaciju na cijevima [3]	10
Slika 7. Idealizirani i realni prikazi slijevanja kondenzata.....	10
Slika 8. Grafički prikaz ukupnog koeficijenata prijelaza topline za kondenzaciju na snopu cijevi	12
Slika 9. Vrste strujanja kod kondenzacije u horizontalnim cijevima	13
Slika 10. Mjehuričasto strujanje.....	13
Slika 11. Glatko-slojevito strujanje.....	14
Slika 12. Valovito-slojevito strujanje.....	14
Slika 13. Plug strujanje.....	15
Slika 14. Slug strujanje.....	15
Slika 15. Prstenasto-maglovito strujanje	15
Slika 16. Baker (1954) mapa strujanja za horizontalne cijevi [4].....	16
Slika 17. Mandhane et al. (1974) mapa strujanja za horizontalne cijevi [4].....	17
Slika 18. Tandon et al. (1982) mapa strujanja za horizontalne cijevi [4]	18
Slika 19. Udio praznine unutar cijevi.....	23
Slika 20. Grafički prikaz koeficijenata prijelaza topline za različite autore u funkciji sadržaja pare	27
Slika 21. Grafički prikaz potrebnih površina izmjene topline za različite autore	28
Slika 22. Fanningov faktor otpora za hidraulički glatke cijevi u funkciji Re [9].....	29
Slika 23. Fanningov faktor otpora u funkciji Re za homogeni model [9].....	30
Slika 24. Chisholmov parametar C [9]	32
Slika 25. Grafički prikaz pada tlaka za različite autore.....	33
Slika 26. Preporučeni promjer segmentnih pregrada u ovisnosti o promjeru plašta [8]	35
Slika 27. Presjek izmjenjivača s rasporedom cijevi unutar plašta.....	36
Slika 28. Koeficijent oslabljenja v_A za izreze u cilindrima [21]	50
Slika 29. Izvedba plitke podnice [22].....	51
Slika 30. Koeficijent oslabljenja β za podnicu bez izreza [23].....	54
Slika 31. Dijagram za određivanje tlaka ulubljivanja [23].....	55
Slika 32. Koeficijent oslabljenja v_A za izreze u kuglama [21].....	57
Slika 33. Ravna prirubnica [22]	58
Slika 34. Faktor v za izracuna umanjenog provrta za vijke [25]	62
Slika 35. Koeficijent C za ukružene ploče [26]	64
Slika 36. Pravilnik o tlačnoj opremi, Dijagram I	76
Slika 37. Pravilnik o tlačnoj opremi, Dijagram IV	77
Slika 38. Nerastavljiva i rastavljiva izvedba pločastog izmjenjivača topline	80
Slika 39. Geometrija lamele pločastog izmjenjivača [7].....	80
Slika 40. Wurfel & Ostrowski (2004) konstante [31]	85
Slika 41. Grafički prikaz koeficijenata prijelaza topline u funkciji sadržaja pare za različite autore	86
Slika 42. Grafički prikaz potrebnih površina izmjene topline za različite autore	86
Slika 43. Grafički prikaz pada tlaka za različite autore.....	88
Slika 44. Protusmjerna U-izvedba pločastog izmjenjivača.....	89
Slika 45. Tablica koeficijenata za jednofazno strujanje kod pločastih izmjenjivača [7]	91

Slika 46. Grafički prikaz ukupnih troškova u funkciji godina	101
--	-----

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tablični proračun koeficijenata prijelaza , prolaza topline i potrebne duljine cijevi	40
Tablica 2. Tablični proračun padova tlaka u cijevima Shell&Tube izmjenjivača	68
Tablica 3. Radijusi zakrivljenosti cijevi u Shell&Tube izmjenjivaču.....	72
Tablica 4. Tablica s konstrukcijskim veličinama držača razmaka	75
Tablica 5. Tablični proračun koeficijenata prijelaza topline, prolaza topline i potrebne površine lamele.....	93

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

Broj crteža	Naziv dijela
FSB-ZR-MR-1	Cijevni priključak DN20
FSB-ZR-MR-2	Lijeva podnica s izrezima
FSB-ZR-MR-3	Lijevi plašt
FSB-ZR-MR-4	Cijevni priključak DN200
FSB-ZR-MR-5	Cijevni priključak DN100
FSB-ZR-MR-6	Desni plašt
FSB-ZR-MR-7	U-cijev
FSB-ZR-MR-8	Segmentna pregrada
FSB-ZR-MR-9	Temeljna ploča
FSB-ZR-MR-10	Postolje
FSB-ZR-MR-11	Cijevna stijenka s uvrtima
FSB-ZR-MR-12	Brtva podnice
FSB-ZR-MR-13	Prirubnica DN700
FSB-ZR-MR-14	Cijevni priključak DN65
FSB-ZR-MR-15	Potporna šipka 2337 mm
FSB-ZR-MR-16	Držać razmaka 496 mm
FSB-ZR-MR-17	Potporna šipka 2587 mm
FSB-ZR-MR-18	Držać razmaka 244 mm
FSB-ZR-MR-19	Držać razmaka 546 mm
FSB-ZR-MR-20	Držać razmaka 298 mm
FSB-ZR-MR-21	Kondenzator

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
Φ	W	Toplinski učin
ϑ	$^{\circ}C$	Temperatura
p	Pa	Tlak
r	kJ/kgK	Specifična toplina isparivanja
ρ	kg/m^3	Gustoća
c_p	J/kgK	Specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku
λ	W/mK	Toplinska provodnost
μ	Pas	Dinamička viskoznost
Pr	-	Prandtlov broj
$\Delta\vartheta_m$	$^{\circ}C$	Srednja logaritamska temperaturna razlika
g	m/s^2	Ubrzanje Zemljine sile teže
α	W/m^2K	Koeficijent prijelaza topline
d	m	Promjer
Γ	kg/ms	Maseni tok kondenzata po jedinici dužine cijevi
Ga	-	Galileov broj
σ	N/m	Površinska napetost
ψ	-	Parametar strujanja
j^*	-	Površinska brzina
G	kg/m^2s	Gustoća masenog toka
a	-	Parametar strujanja
x	kg/kg	Sadržaj pare
X	-	Parametar strujanja
θ	rad^{-1}	Kut od vrha cijevi do kondenzata
ε	-	Volumetrički sadržaj pare
Ja	-	Jakobov broj
Fr	-	Freudov broj
Nu	-	Nusseltov broj
q_m	kg/s	Maseni tok

q_v	m^3/s	Volumni tok
δ_F^+	m	Debljina filma
τ	Pa	Smično naprezanje
K_W	-	Korekcija za smična naprezanja
f	-	Fanningov faktor otpora
λ_{DW}	-	Darcy-Weisbach faktor otpora
ϕ_l	-	Dvofazni množitelj kapljevine
ϕ_{lo}	-	Dvofazni množitelj samo kapljevine
ϕ_v	-	Dvofazni množitelj pare
ϕ_{vo}	-	Dvofazni množitelj samo pare
s	m	Debljina stijenke
A	m^2	Površina
w	m/s	Brzina
L_M	m	Razmak između segmentnih pregrada
γ	rad^{-1}	Središnji kut
H	m	Visina odsječka pregrade
S	m^2	Presjek strujanja
k	W/m^2K	Koeficijent prolaza topline
\bar{k}	W/m^2K	Koeficijent prolaza topline
v	m^3/kg	Specifični volumen
R	J/kgK	Plinska konstanta
κ	-	Izentropski eksponent
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Granica razvlačenja
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
f_d	N/mm^2	Proračunska čvrstoća za radno stanje
f_a	N/mm^2	Proračunska čvrstoća za okolišno stanje
PT	bar	Proračunska čvrstoća za ispitni tlak
v_A	-	Koeficijent oslabljenja
r	m	Radijus
β	-	Koeficijent oslabljenja

T	K	Temperatura
E	N/mm^2	Modul elastičnosti
p_B	Pa	Tlak ulubljivanja
F	N	Sila
W	mm^3	Moment otpora
ν	-	Koeficijent oslabljenja
g	m	Širina zavora
t	m	Korak cijevi
ξ	-	Koeficijent otpora
V	m^3	Volumen
t_s	m	Debljina lamele
L_h	m	Horizontalna udaljenost između priključaka
L_w	m	Efektivna širina kanala
ϕ	-	Faktor povećanja
β	$^\circ$	Kut žlijebova
b	m	Dubina žlijeba
D_h	m	Hidraulički promjer
l	m	Duljina valovitosti
L_p	m	Efektivna visina kanala
Bo	-	Broj isparivanja
K	kn	Kupovna cijena
t_g	h	Broj sati rada
C	kn/kWh	Cijena struje
P	W	Snaga za pogon pumpe
t_{vp}	god	Vremenski period

POPIS INDEKSA

Indeks	Opis
k	kondenzacija
$krit$	kritični
sr	srednje
w	voda
RT	radna tvar
l	kapljevina
v	para
Γ	kondenzat
NU	Nusselt
KR	Kern
ESB	Eisenberg
1	početna cijev
vc	vertikalni snop cijevi
t	turbulentno
v	para
z	zrak
ekv	ekvivalentno
AK	Akers
CZ	Cavallini-Zecchin
tt	turbulentno-turbulentno
TR	Traviss
SH	Shah
TG	Tang
DC	Dobson-Chato
str	slojevito
vs	valovito-slojevito
so	Soliman
kar	karakteristična

<i>lm</i>	laminarno
<i>uk</i>	ukupni
<i>g</i>	glatke
<i>VDI</i>	VDI Heat Atlas
<i>u</i>	unutarnji
<i>v</i>	vanjski
<i>cij</i>	cijev
<i>f</i>	trenje
<i>S&T</i>	Shell&Tube
<i>DW</i>	Darcy-Weisbach
<i>H</i>	homogeni
<i>lo</i>	samo kapljevina
<i>vo</i>	samo para
<i>Cu</i>	bakar
<i>pret</i>	pretpostavljeni
<i>pr</i>	priključak
<i>ul</i>	ulaz
<i>izl</i>	izlaz
<i>U</i>	uzdužna zona
<i>M</i>	međuzona
<i>pot</i>	potrebna
<i>kond</i>	kondenzat
<i>SV</i>	sigurnosni ventil
<i>min</i>	minimalni
<i>K</i>	kalota
<i>T</i>	torus
<i>B</i>	brtva
<i>MKZ</i>	međuzona i krajnja zona
<i>pod</i>	podnica
<i>sp</i>	segmentne pregrade

<i>dr</i>	držači razmaka
<i>YN</i>	Yan
<i>PL</i>	Palmer
<i>TB</i>	Thonon&Bontemps
<i>HN</i>	Han
<i>WO</i>	Wurfel&Ostrowski
<i>LE</i>	Lee
<i>kan</i>	kanal
<i>SS</i>	nehrđajući čelik
<i>PI</i>	pločasti izmjenjivač
<i>g</i>	radni sati
<i>P</i>	pumpa
<i>vp</i>	Vremenski period

SAŽETAK

U ovom radu konstruirani su Shell&Tube i pločasti vodom hlađeni kondenzatori za parametre zadane u programskom zadatku. Prilikom konstruiranja Shell&Tube izmjenjivača provedeni su termodinamički, hidraulički i proračun čvrstoće, dok su kod pločastog izmjenjivača provedeni termodinamički i hidraulički proračun. U radu su prikazani različiti izrazi za izračun koeficijenta prijelaza topline i pada tlaka tijekom potpune kondenzacije. Ti izrazi su zatim uspoređeni za zadane početne uvjete i s parametrima izračunatim tijekom konstruiranja izmjenjivača. Provedena je i financijska analiza kroz vremenski period, gdje su uspoređeni investicijski i pogonski troškovi za oba tipa izmjenjivača

Ključne riječi: Shell&Tube, pločasti izmjenjivač, izmjenjivač topline, koeficijent prijelaza topline, pad tlaka, kondenzacija

SUMMARY

In this paper, Shell&Tube and Plate water cooled condensers are designed for the parameters set in the program assignment. During the design of the Shell&Tube heat exchanger, thermodynamic, hydraulic and strength calculations were performed, while a thermodynamic and hydraulic calculations were performed on the Plate heat exchanger. Different terms for calculating heat transfer coefficient and pressure drop during complete condensation are shown in this paper. These expressions are then compared for the default conditions and the parameters calculated during the design of the heat exchangers. A financial analysis was conducted over a period of time, where the investment and operating cost were compared for both types of heat exchangers.

.
Key words: Shell&Tube, Plate heat exchanger, heat exchanger , heat transfer coefficient, pressure drop, condensation

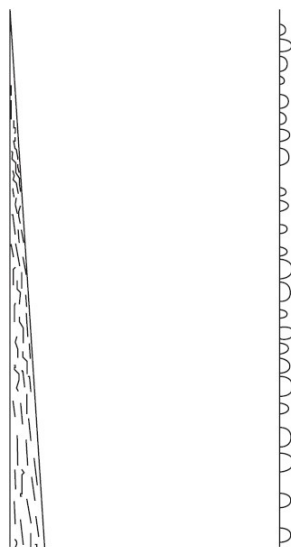
1. UVOD

Promjena stanja iz parovite faze u kapljevitu fazu naziva se kondenzacija. Kondenzacija igra veoma važnu ulogu kako u prirodi, tako i u industriji. Tijekom kondenzacije dolazi do promjene faze, a time i oslobađanja latentne topline, koja prolazi kroz površinu i prenosi se na rashladni medij, te dolazi do nastajanja kondenzata. Postoji više mehanizama kondenzacije, a koji od njih će se javiti ovisi o uvjetima u kojima se nalazi tvar koja kondenzira.

Homogena kondenzacija događa se tijekom formacije rose, magle i oblaka, pri čemu para kondenzira u obliku kapljica sadržanih u plinovitoj fazi.

Direktna kondenzacija se javlja kada zasićena ili pregrijana para dođe u kontakt s kapljevnom čija je temperatura ispod temperature zasićenja pare.

Ipak jedan od najčešćih mehanizama kondenzacije u industriji je onaj kada pregrijana ili zasićena para dođe u kontakt s površinom čija je temperatura manja od temperature zasićenja pare, pri čemu može doći do filmske ili kapljičaste kondenzacije.



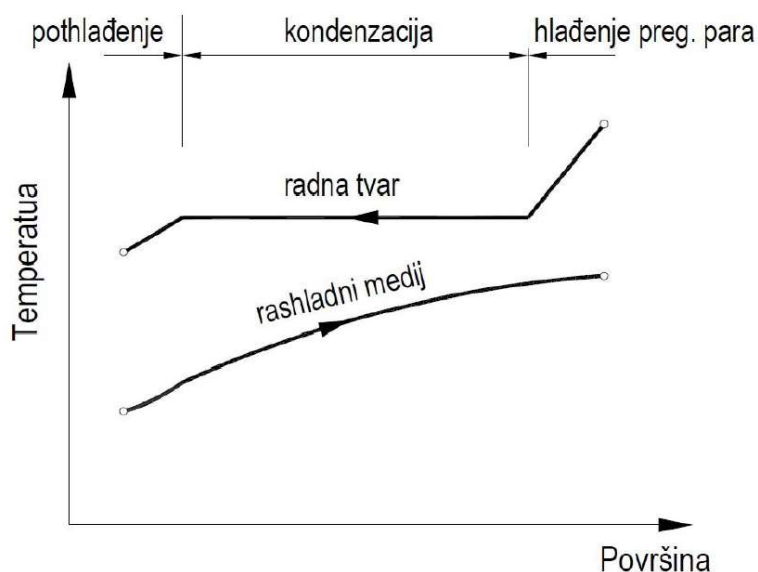
Slika 1. Filmska i kapljičasta kondenzacija

Filmska kondenzacija se javlja kada zasićena ili pregrijana para dođe u kontakt s površinom temperature ispod temperature zasićenja pare koja se može ovlažiti. Tada se kao nastali kondenzat javlja film, koji lagano struji po površini pod utjecajem gravitacije. Debljina filma ovisi o mnogim parametrima kao što su orijentacija površine, viskoznost, količina nastalog kondenzata itd. Nastali film pruža toplinski otpor prijenosu topline između pare i hladne površine, što rezultira smanjenim koeficijentima prijelaza topline.

Kapljičasta kondenzacija se javlja kada zasićena ili pregrijana para dođe u kontakt s površinom temperature ispod temperature zasićenja pare koja se ne može ovlažiti. Tada se kao nastali kondenzat javljaju kapljice, koje rastu sve dok ne budu odnešene zbog velike brzine pare ili pod utjecajem gravitacije. Za razliku od filmske kondenzacije, ovdje nema nastalog filma kondenzata, već je para u direktnom kontaktu s cijelom izmjenjivačkom površinom, čime se prijenos topline poveća 3-4 puta. Kako bi se potaknula kapljičasta

kondenzacija, na kontaktne površine uobičajeno se stavljaju premazi od silikona, teflona ili voska, čime se sprječava ovlaživanje površine. Međutim kroz određeni period vremena ti premazi gube svoju učinkovitost. Zbog potrebe za ostvarivanjem konstantnih toplinskih učina izmjenjivača, a s obzirom da su koeficijenti prijelaza topline za filmsku kondenzaciju manji od onih za kapljičastu, te zbog već navedenih problema s premazima, preporuča se koristiti izraze za filmsku kondenzaciju prilikom konstruiranja.

U ovom radu dani su izrazi za koeficijente prijelaza topline i pada tlaka koji su razvijeni uzimajući u obzir mehanizam filmske kondenzacije, a koristiti će se pri dimenzioniranju i međusobnoj usporedbi za zadane uvjete u programskom zadatku.



Slika 2. Temperaturni profil na kondenzatoru

2. ULAZNI PODATCI

U programskom zadatku kao radna tvar koja kondenzira zadan je propan (R290), a kao rashladni medij voda. Za temperature i tlakove oba medija zadana u zadatku očitana su fizikalna svojstva koja će se koristiti u svim analizama izmjene topline i pada tlaka, kao i u termodinamičkim i hidrauličkim proračunima Shell&Tube i pločastog izmjenjivača.

Toplinski učin

$$\Phi = 300 \text{ kW}$$

2.1. Fizikalna svojstva propana

Temperatura kondenzacije

$$\vartheta_k = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Tlak kondenzacije

$$p = 13,7 \text{ bar}$$

Za odgovarajući tlak i temperaturu kondenzacije očitana su fizikalna svojstva [1].

Kritični tlak

$$p_{krit} = 42,4 \text{ bar}$$

Specifična toplota isparivanja

$$r = 306,5 \text{ kJ/kgK}$$

2.1.1. Fizikalna svojstva kapljevine propana

Gustoća

$$\rho' = 467,3 \text{ kg/m}^3$$

Specifični toplinski kapacitet

$$c_p' = 2943,3 \text{ J/kgK}$$

Toplinska provodnost

$$\lambda' = 0,0858 \text{ W/mK}$$

Dinamička viskoznost

$$\mu' = 0,00008249 \text{ Pas}$$

Prandtlov broj

$$Pr' = 2,2897$$

2.1.2. Fizikalna svojstva pare propana

Gustoća

$$\rho'' = 3,02 \text{ kg/m}^3$$

Specifični toplinski kapacitet

$$c_p'' = 2279,7 \text{ J/kgK}$$

Toplinska provodnost

$$\lambda'' = 0,00215 \text{ W/mK}$$

Dinamička viskoznost

$$\mu'' = 0,00000942 \text{ Pas}$$

Prandtlov broj

$$Pr'' = 0,9988$$

2.2. Fizikalna svojstva rashladne vode

Tlak rashladne vode

$$p = 2 \text{ bar}$$

Temperatura vode na ulazu

$$\vartheta_{ulaz} = 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Temperatura vode na izlazu

$$\vartheta_{izlaz} = 33 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Srednja temperatura vode između ulaza i izlaza

$$\vartheta_{sr} = \frac{\vartheta_{ulaz} + \vartheta_{izlaz}}{2} = \frac{28 + 33}{2} = 30,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Svojstva vode očitati će se za srednju temperaturu vode $\vartheta_{sr} = 30,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [2].

Gustoća

$$\rho_w = 995,54 \text{ kg/m}^3$$

Specifični toplinski kapacitet

$$c_{p,w} = 4179,6 \text{ J/kgK}$$

Toplinska provodnost

$$\lambda_w = 0,6164 \text{ W/mK}$$

Dinamička viskoznost

$$\mu_w = 0,0007889 \text{ Pas}$$

Prandtllov broj

$$Pr_w = 5,349$$

2.3. Srednja logaritamska temperaturna razlika

Srednja logaritamska razlika temperatura

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\Delta\vartheta_V - \Delta\vartheta_M}{\ln\left(\frac{\Delta\vartheta_V}{\Delta\vartheta_M}\right)}$$

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(\vartheta_k - \vartheta_{w,ul}) - (\vartheta_k - \vartheta_{w,izl})}{\ln\left(\frac{\vartheta_k - \vartheta_{w,ul}}{\vartheta_k - \vartheta_{w,izl}}\right)}$$

$$\Delta\vartheta_m = \frac{(40 - 28) - (40 - 33)}{\ln\left(\frac{40 - 28}{40 - 33}\right)}$$

$$\Delta\vartheta_m = 9,276 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

3. KONDENZACIJA U SHELL&TUBE IZMJENJIVAČIMA

3.1. Općenito o Shell&Tube izmjenjivačima

Shell & Tube jedni su od najsvestranijih izmjenjivača topline. Sastoje se od plašta u kojemu struji jedan medij i snopa cijevi u kojima struji drugi medij. Koriste se u procesnoj industriji, u konvencionalnim i nuklearnim elektranama kao kondenzatori, u klimatizacijskim i rashladnim sustavima te su jedan od najčešćih tipova izmjenjivača u naftnoj i kemijskoj industriji.

Ovakav tip izmjenjivača daje relativno velike omjere potrebne površine za prijenos topline prema volumenu i težini, a mogu se i vrlo lako čistiti. Nude veliku fleksibilnost u gotovo svim primjenama. Mogu se dizajnirati za velike projektne tlakove kao i za razlike tlakova između različitih medija koji u njima struje.



Slika 3. Shell&Tube izmjenjivač topline

3.2. Kondenzacija na cijevima

Uobičajena izvedba Shell&Tube izmjenjivača u funkciji kondenzatora izvodi se s kondenzacijom radne tvari na cijevima, dok rashladni medij struji u cijevima, čime se dobivaju veliki koeficijenti prijelaza topline na strani radne tvari što posljedično vodi do većeg koeficijenta prolaza topline, a time i manje površine.

3.2.1. Laminarna kondenzacija na cijevima

Laminarna filmska kondenzacija se javlja kada kondenzat teče s vrha cijevi prema dolje pod utjecajem gravitacije. Strujanje je laminarno, a temperaturni profil se smatra razvijenim od početnog ruba. Temperaturni profil po presjeku filma je linearan i pretpostavlja se jednodimenzijnsko provođenje topline.

Ostale Nusseltove pretpostavke:

- Temperatura pare je konstantna i jednaka temperaturi zasićenja
- Gravitacija je jedina vanjska sila koja djeluje na kondenzat (moment je zanemaren)
- Granični sloj pare ne izaziva otpor prema filmu

-Svojstva fluida su konstantna

-Osjetno hlađenje kondenzata je zanemarivo u odnosu na latentno

Nusseltova jednadžba za izmjenu topline [3].

$$\alpha_{NU} = 0,728 \cdot \left(\frac{\rho_l \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot g \cdot \lambda_l^3 \cdot r}{\mu_l \cdot (\vartheta_k - \vartheta_s) \cdot d_v} \right)^{1/4}$$

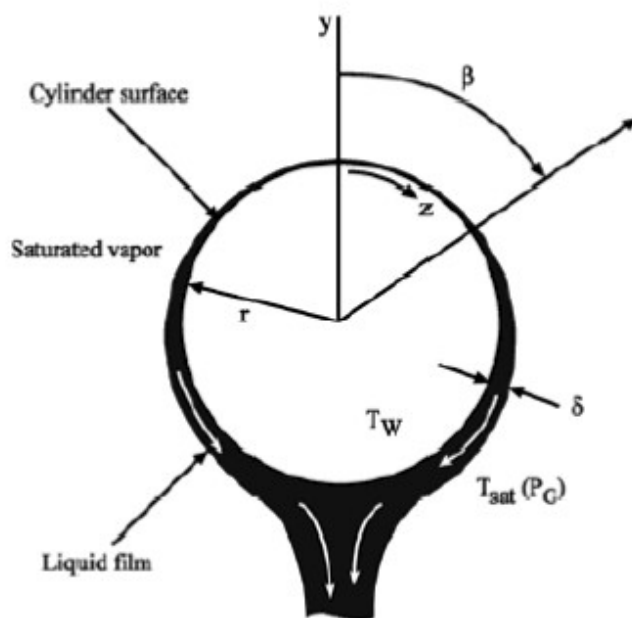
Unatoč pojednostavljenjima koeficijenti izmjene topline izračunat Nusseltovim izrazom su poprilično točni. Koeficijenti izmjene topline dobijeni mjerenjem su +25% veći nego oni dobijeni analitički. Glavni razlog za to je postojanje valova na površini filma kondenzata koji pospješuju izmjenu topline, a zanemareni su u izvodu izraza.

Stoga Whitaker predlaže 20% veću vrijednost izraza.

Whitakerova korekcija [3].

$$\alpha_{WT} = 1,137 \cdot \left(\frac{\rho_l \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot g \cdot \lambda_l^3 \cdot r}{\mu_l \cdot (\vartheta_k - \vartheta_s) \cdot d_v} \right)^{1/4}$$

Za izračun koeficijenta prijelaza topline kod Shell&Tube izmjenjivača topline uobičajeno se koeficijent prijelaza topline računa za jednu cijev, a kasnije se izvrši korekcija za N broj cijevi. U većini slučajeva prilikom kondenzacije na cijevi strujanje će biti laminarno zbog kratke duljine oko promjera cijevi.



Slika 4. Laminarna filmska kondenzacija na cijevima

3.2.2. Vrste strujanja

3.2.2.1. Kapljičasto strujanje

Kondenzat teče sa cijevi na cijev kao pojedinačne kapljice uzastopno jedna za drugom, u većini slučajeva u jednakim intervalima i pri jednolikoj brzini. Veličina kapljica ovisi o svojstvima fluida, prvenstveno razlici gustoće, površinskoj napetosti i dinamičkoj viskoznosti. Kapljice se stvaraju jer kontinuirani film na dnu cijevi postaje nestabilan kao rezultat Kelvin-Helmholtzove nestabilnosti, što uzrokuje stvaranje tekućih kapljica s karakterističnim valnim duljinama tako da se kapljice mlaznice formiraju u gotovo jednakim intervalima duž dna cijevi.

3.2.2.2. Stupičasto strujanje

Pri većim masenim protocima, mlazovi kapljica se formiraju kao pojedinačna tekućina u obliku stupova koji se protežu od dna gornje cijevi do vrha donje cijevi. Kapljeviti stupovi udaraju gornji dio donje cijevi kao mlazovi i šire se duž cijevi slijevajući se prema dnu. Stupci također mogu biti u nizu jedan iznad drugog u svakom uzastopnom red cijevi.

3.2.2.3. Lističasto strujanje

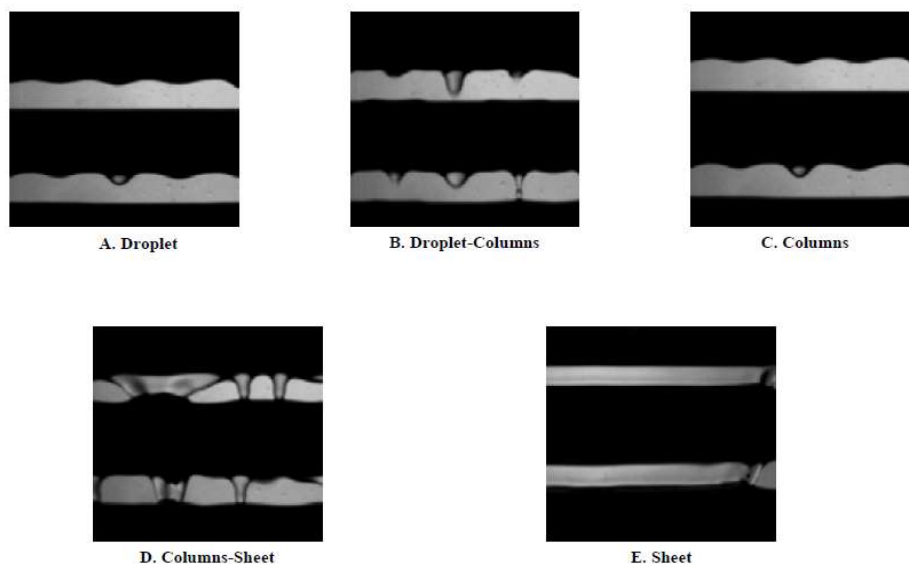
Pri još većim masenim protocima kondenzata, stupci postaju nestabilni i oblikuju kratke slojeve tekućih listova koji teču s jedne cijevi na drugu. Kada se kondenzira dovoljno tekućine, nestabilni listovi spajaju se i počinju oblikovati jedan neprekinuti list tekućine koji pada s gornje cijevi na donju. To se događa samo ako je međuprostorni razmak dovoljno mali da spriječi raspadanje listova. Za usko raspoređene redove cijevi, ako je linija lista nestabilna, može doći do spajanja na stranu sljedeće cijevi koja se ne nalazi direktno ispod. U ovoj vrsti strujanja također je vidljiva prisutnost mreškanja i valova.

3.2.2.4. Prskajuće strujanje

Pod utjecajem strujanja pare s kompleksnim strujnim poljem oko cijevi, bilo koji od gore spomenutih vrsta strujanja može se prekinuti i kondenzat može biti odnesen. U ovom slučaju dolazi do značajnog zahvaćanja kapljica kondenzata u paru koja struji između cijevi te se formira prskajuće strujanje. Svako strujanje kondenzata koji teče s jedne cijevi na drugu se odvija na vrlo kaotičan način. Kod rijetko raspoređenog rasporeda cijevi na kondenzatne stupove i kapljice strujanje pare utječe vrlo lako, a osobito gdje se granični sloj pare odvaja s bočnih strana cijevi u vrtlozima i u recirkulacijskom području iza cijevi. Kod visokih masenih protoka pare, veliki dio kondenzata se zahvati kao male tekuće kapljice, što rezultira vrlo tankim tekućim filmovima kondenzata na cijevi.

3.2.3. Mape strujanja

Hu & Jacobi (1996) [3] predložili su jednadžbe za mapu strujanja koja sadrži Re_Γ (Reynoldsov broj za kondenzat) i Galileov broj za sljedeća strujanja: lističasto strujanje, stupačasto strujanje i kapljičasto strujanje. Zone gdje se ova tri primarna strujanja preklapaju također su uvedeni kao vrste strujanja.



Slika 5. Vrste strujanja kod laminarne kondenzacije na cijevima

Maseni tok kondenzata na jednoj strani cijevi po jedinici dužine cijevi, za kut β (Slika 4.)

$$\Gamma = \frac{\rho_l \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot g \cdot \lambda_l^3 \cdot \sin\beta}{3\mu_l}$$

Reynoldsov broj za kondenzat

$$Re_\Gamma = \frac{4\Gamma(z)}{\mu_l}$$

Galileov broj

$$Ga_l = \frac{\rho_l \cdot \sigma^3}{\mu_l^4 \cdot g}$$

Prijelazni izrazi za vrste strujanja

Kapljičasti—Kapljičasto-stupačasti

$$Re_\Gamma = 0,074 \cdot Ga_l^{0,302}$$

Kapljičasto-stupačasti—Stupačasti

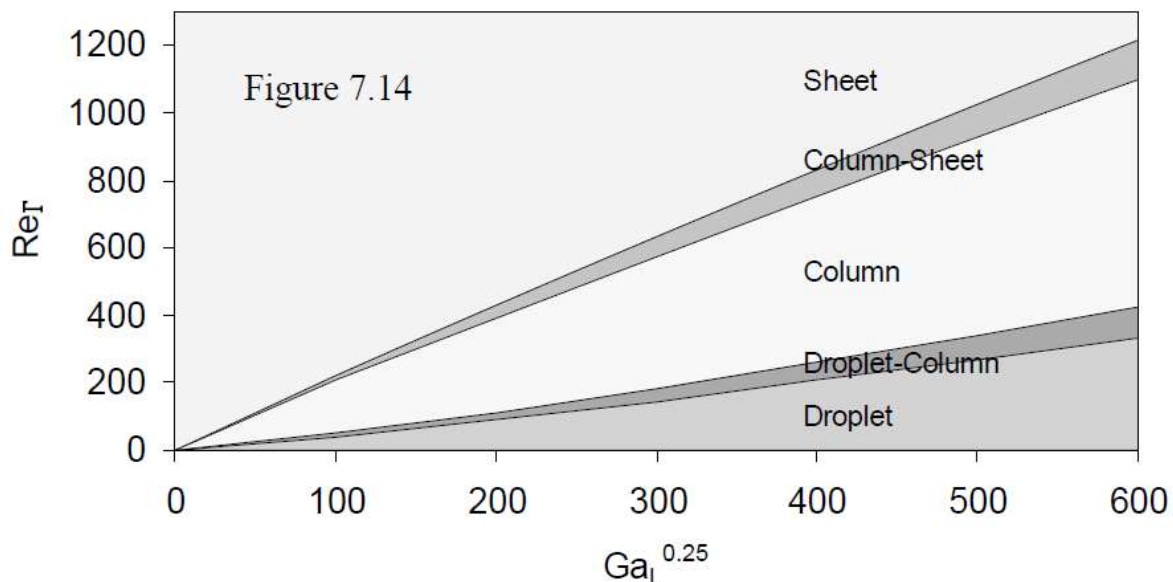
$$Re_\Gamma = 0,096 \cdot Ga_l^{0,301}$$

Stupičasti—Stupičasto-lističasti

$$Re_{\Gamma} = 1,414 \cdot Ga_l^{0,233}$$

Stupičasto-lističasti—Lističasti

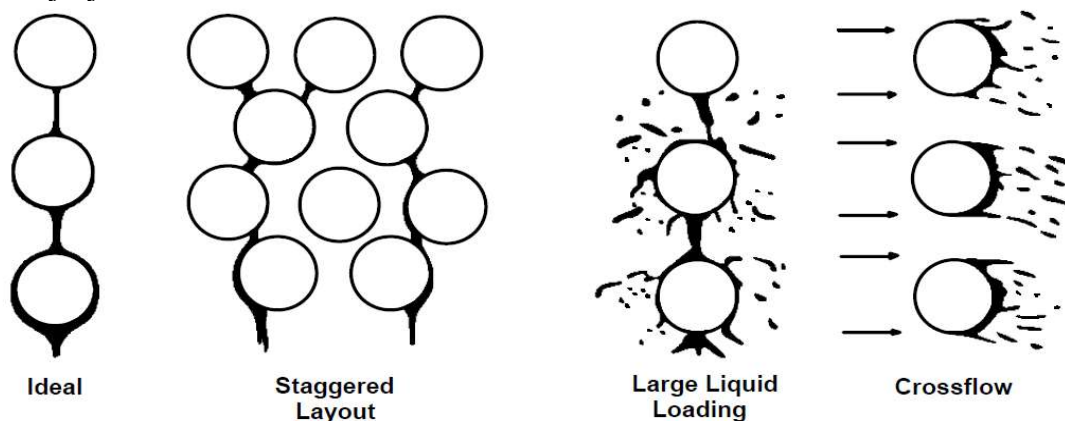
$$Re_{\Gamma} = 1,448 \cdot Ga_l^{0,236}$$



Slika 6. Hu & Jacobi (1996) mapa strujanja za laminarnu kondenzaciju na cijevima [3]

3.2.4. Laminarna kondenzacija na snopu cijevi

Kondenzacija na snopu cijevi uvelike se razlikuje od kondenzacije na jednoj cijevi. U Nusseltovom idealiziranom modelu kondenzat se slijeva pod utjecajem gravitacije u kontinuiranom, laminarnom sloju. Međutim, u realnosti zbog utjecaja susjednih cijevi dolazi do različitih odstupanja, koja ovise o udaljenosti, promjeru i rasporedu cijevi. Također je i eksperimentalno poznato da se kondenzat ne slijeva kontinuirano, već se stvaraju kapljice koje udaraju u gornju površinu donje cijevi što izaziva prskanje, ali i velika brzina strujanja pare može otrgnuti kondenzat sa cijevi, kao što je već spomenuto prilikom opisivanja različitih vrsta strujanja kondenzata.



Slika 7. Idealizirani i realni prikazi slijevanja kondenzata

Prilikom slijevanja kondenzata pod utjecajem gravitacije na donje cijevi, debljina kondenzata oko cijevi se povećava, a tako i otpor prijelazu topline, te se koeficijent prijelaza topline smanjuje.

Za vertikalni snop s N cijevi predložene su sljedeće jednadžbe za ukupni koeficijent prijelaza topline.

α_1 - koeficijent prijelaza topline na prvoj cijevi vertikalnog snopa [W/m^2K]

3.2.4.1. Nusselt

Nusselt [3] daje izraz koji je dobijen analizom svake cijevi u vertikalnom nizu sumiranjem kondenzata koji se slijeva s gornjih na donje cijevi do N-te cijevi, a vrijedi ako strujanje kondenzata do N-te cijevi ostane laminarno.

$$\alpha_{NU,vc} = \alpha_1 \cdot N_{vc}^{-\frac{1}{4}}$$

3.2.4.2. Kern

Kern [3] iz eksperimentalnih rezultata i iskustva u konstruiranju kondenzatora smatra da je Nusseltov izraz konzervativan, što ima za rezultat predimenzionirane kondenzatore, te sam predlaže izraz za ukupni koeficijent izmjene topline.

$$\alpha_{KR,vc} = \alpha_1 \cdot N_{vc}^{-\frac{1}{6}}$$

3.2.4.3. Eisenberg

Eissenberg [3] eksperimentalno istražuje efekte kondenzacije na snopu cijevi i predviđa manje poplavljivanje cijevi.

$$\alpha_{ESB,vc} = \alpha_1 \cdot (0,6 + 0,42 \cdot N_{vc}^{-\frac{1}{4}})$$

3.2.5. Usporedba izraza za izmjenu topline

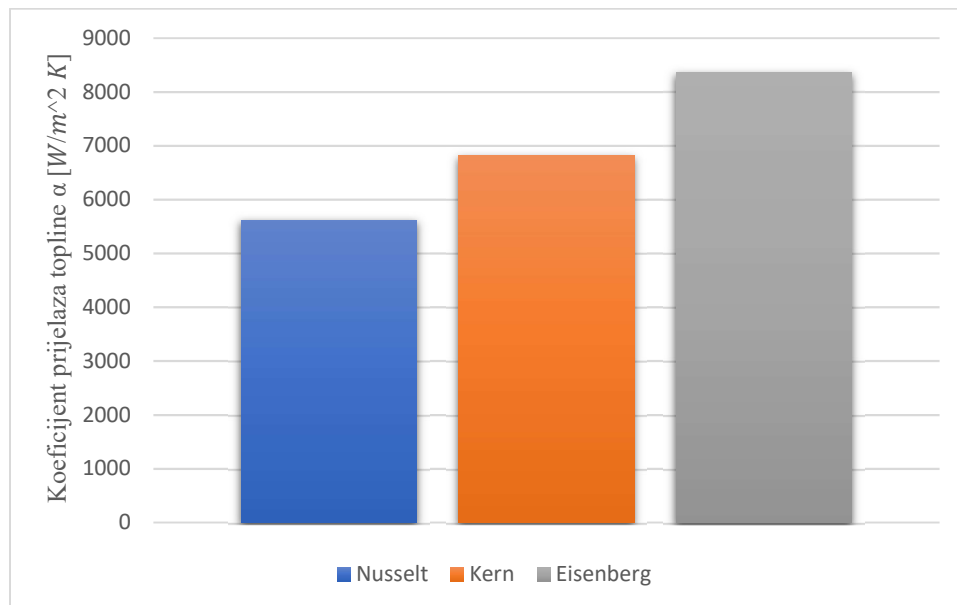
Usporedba izraza za izmjenu topline računati će se za isti broj cijevi u vertikalnom rasporedu, kao i za isti koeficijent prijelaza topline na početnoj cijevi.

Koeficijent prijelaza topline na prvoj cijevi vertikalnog snopa

$$\alpha_1 = 10\,000\, W/m^2K$$

Broj cijevi u vertikalnom snopu

$$N_{vc} = 10$$



Slika 8. Grafički prikaz ukupnog koeficijenta prijelaza topline za kondenzaciju na snopu cijevi

Iz grafičkog prikaza usporedbe ukupnog koeficijenta za prijelaz topline za vertikalni snop cijevi može se doći do zaključka kako će se najveći koeficijent prijelaza topline dobiti preko Eisenbergova izraza, najmanji preko Nusseltova, dok će Kernov izraz imati srednju vrijednost.

3.2.6. Turbulentna kondenzacija na cijevima

U kondenzatoru se uz laminarno može javiti i turbulentno strujanje kondenzata, što dosta pospješuje koeficijent prijenosa topline. Turbulentno strujanje se javlja kada je Reynoldsov broj za kondenzat Re_F veći ili jednaki od 1600 (neki autori u obzir uzimaju vrijednosti od 1200, 1800 ili 2000).

Koeficijent prijelaza topline [3]

$$\alpha_t = 0,023 \cdot \lambda_l \cdot Re_F^{0,025} \cdot Pr_l^{0,5} \left(\frac{\rho_l \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot g}{\mu_l^2} \right)^{1/3}$$

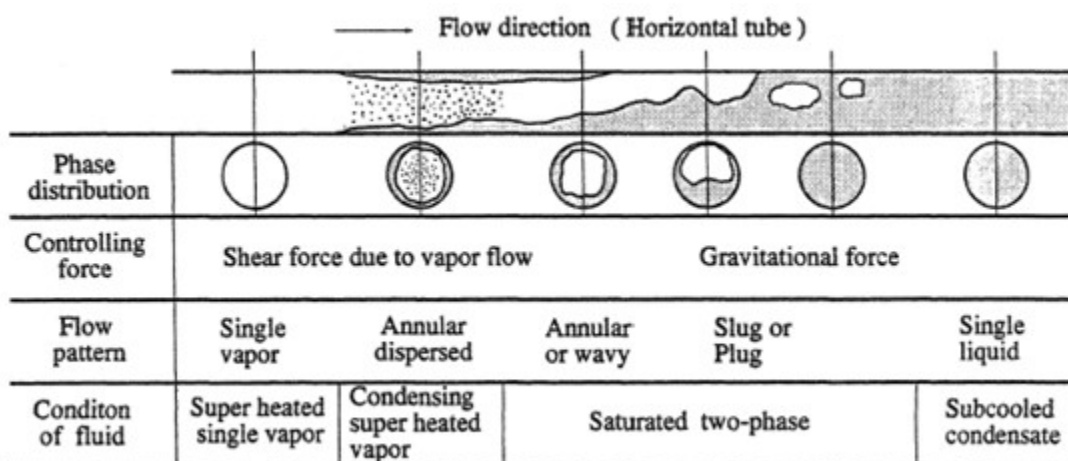
3.3. Kondenzacija u horizontalnim cijevima

Tijekom kondenzacije unutar cijevi, izračun koeficijenta prijelaza topline je otežan jer se unutar cijevi konstantno mijenjaju vrste strujanja. Svako strujanje drugačije utječe na koeficijent prijelaza topline, što zahtijeva da se proračun odvija po dužini cijevi. Kondenzacija unutar cijevi ima dvije glavne pokretačke sile: jedna je gravitacija, dok je druga smično naprezanje. Ukoliko para na ulazu u kondenzator dolazi pri velikoj brzini pri dodiru sa

stijenkom manje temperature početi će se stvarati kondenzat po opsegu cijevi, te će para u sredini cijevi strujati velikom brzinom, a kondenzat po opsegu malom brzinom. Takvo strujanje naziva se prstenasto strujanje. Daljnjim tijekom kondenzacije debljina filma počinje biti sve veća te sve neravnomjernije raspoređena po opsegu, pri čemu zbog utjecaja gravitacije dolazi do nakupljanja kondenzata u donjem dijelu cijevi. Tada se velik dio procesa kondenzacije odvija pri vrhu cijevi, gdje je sloj kondenzata najmanji, a time i toplinski otpor izmjeni topline. Takvo strujanje naziva se slojevito strujanje. Prstenasto i slojevito strujanje dva su najvažnija strujanja u slučajevima kondenzacije unutar cijevi, te je većina izraza za izračun koeficijenta izmjene topline bazirana na njihovim značajkama.

3.3.1. Vrste strujanja

Dvofazna mješavina kapljevine i pare može tvoriti različite konfiguracije tijekom strujanja kroz cijevi. U jednofaznom strujanju fluida razlikujemo laminarno, prijelazno i turbulentno područje strujanja, čije se osobine u pogledu prijenosa topline i mase uvelike razlikuju. Slična situacija se javlja kod dvofaznog strujanja, gdje se javlja više specifičnih vrsta strujanja. Vrsta strujanja najvažnije je svojstvo bilo kojeg dvofaznog problema, te bilo kakvo korištenje jednadžbi za očuvanje energije/mase mora biti točno prilagođeno pojedinom režimu.



Slika 9. Vrste strujanja kod kondenzacije u horizontalnim cijevima

3.3.1.1. Mjehuričasto strujanje

Mjehurići pare raspršuju se u kapljevini s visokom koncentracijom mjehurića u gornjoj polovini cijevi zbog svoje male gustoće. Kada su prevladavajuće smične sile, mjehurići se obično raspršuju jednolično u cijevi. U horizontalnim cijevima se obično pojavljuje samo pri velikim masenim protocima.



Slika 10. Mjehuričasto strujanje

3.3.1.2. Glatko-slojevito strujanje

Pri niskim brzinama kapljevine i pare dolazi do potpunog odvajanja dviju faza. Para ide na vrh, a kapljevina na dno cijevi, odvojeni neometanim horizontalnim sučeljem. Zbog toga su kapljevina i para u potpunosti razdvojeni u ovoj vrsti strujanja.



Slika 11. Glatko-slojevito strujanje

3.3.1.3. Valovito-slojevito strujanje

Povećanjem brzine pare u slojevitom strujanju stvaraju se valovi na sučelju i kreću u smjeru gibanja. Amplituda valova je veoma primjetna i ovisi o relativnoj brzini dviju faza, međutim njihovi vrhovi ne dosežu vrh cijevi. Valovi se penju sa strane cijevi, ostavljajući tanke filmove kondenzata na stijenka nakon prolaska vala.



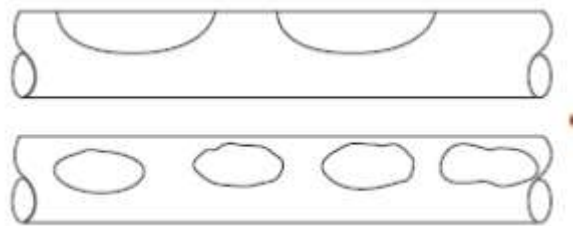
Slika 12. Valovito-slojevito strujanje

3.3.1.4. Naizmjenično strujanje

Daljnjim povećavanjem brzine pare, ti valovi postaju dovoljno veliki da dodiruju vrh cijevi. Ovu vrstu strujanja karakterizira velika amplituda vala s povremenim dodirivanjem vrha cijevi s manjim amplitudnim valovima između. Valovi s velikom amplitudom često sadrže zahvaćene mjehuriće. Gornji dio cijevi je gotovo neprekidno natopljen valovima velikih amplituda i nakon njih ostaje tanak sloj filma. Naizmjenično strujanje je sastavljeno od plug i slug strujanja.

3.3.1.5. Plug strujanje

Ova vrsta strujanja ima tekuće čepove koji su odvojeni izduženim mjehurićima pare. Promjeri izduženih mjehurića su manji od cijevi tako da je kapljevita faza kontinuirana duž dna cijevi ispod izduženih mjehurića. Ova vrsta strujanja se također ponekad naziva i strujanjem izduženih mjehurića.



Slika 13. Plug strujanje

3.3.1.6. Slug strujanje

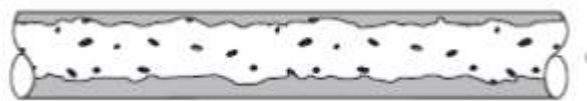
Kod većih brzina pare, promjeri izduženih mjehurića postaju jednaki visini kanala. Kapljeviti grumeni koje razdvajaju takve izdužene mjehuriće također se mogu opisati kao valovi velikih amplituda.



Slika 14. Slug strujanje

3.3.1.7. Prstenasto-maglovito strujanje

Pri vrlo visokim brzinama pare, prstenasti film se smanjuje smicanjem plinske jezgre na sučelju sve dok ne postane nestabilan i uništen, tako da je sva kapljevina zarobljena u obliku kapljica u kontinuiranoj parovitoj fazi, analogno inverznom mjehuričastom strujanju. Otpuštanje kapljica kapljevina povremeno mlazom lokalno ovlaži stijenke cijevi. Kapljice u magli često su premale da ih se vidi bez posebnog osvjetljenja i/ili povećanja.



Slika 15. Prstenasto-maglovito strujanje

3.3.1.8. Prstenasto strujanje

Kod još većih brzina pare, kapljevina stvara kontinuirani prstenasti film oko ruba cijevi, dok je film kondenzata deblji na dnu od vrha. Sučelje između tekućeg prstena i parovite jezgre poremećeno je valovima malih amplituda, a kapljice mogu biti raspršene u plinovitoj jezgri.

3.3.2. Mape strujanja

Mape strujanja najlakši su način kako odrediti vrste strujanja tijekom kondenzacije. Uobičajeno su to dvodimenzionalne mape s koordinatama koje se mogu lako izračunati. Većina korištenih mapa je izrađena s podacima za horizontalne i vertikalne cijevi malog i srednjeg promjera ($1 < d_u < 10$ cm) te za fluide čija su svojstva slična svojstvima vode.

3.3.2.1. Baker (1954)

Bakerova mapa strujanja [4] izrađena je s podacima mješavine zrak-voda za istosmjerno horizontalno strujanje

Parametri

$$\lambda = \left(\frac{\rho_v}{\rho_z} \cdot \frac{\rho_l}{\rho_w} \right)^{0,5}$$

$$\psi = \left(\frac{\sigma_w}{\sigma} \right) \left[\left(\frac{\mu_l}{\mu_w} \right) \cdot \left(\frac{\rho_w}{\rho_l} \right) \right]^{0,5}$$

Svojstva vode potrebna za izračun

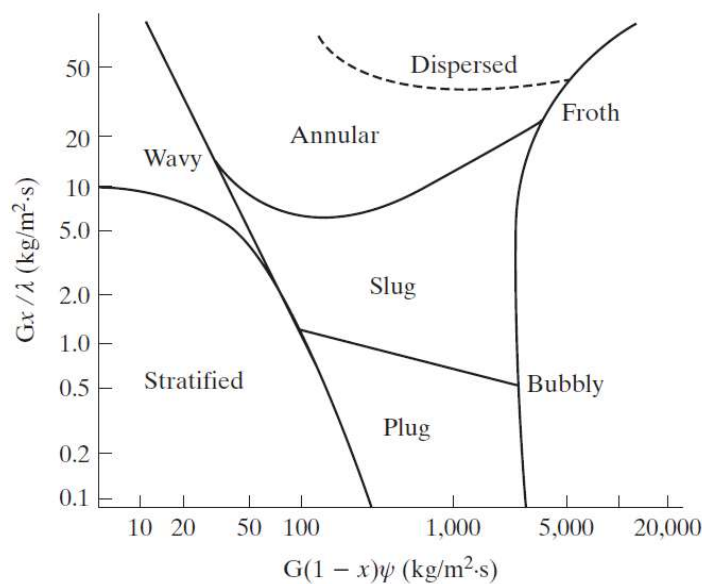
$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_z = 1,23 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_w = 0,001 \text{ Pas}$$

$$\sigma_w = 0,072 \text{ N/m}$$

Parametri se koriste kako bi ispravili odmake od svojstava zraka i vode. Indeks „l“ predstavlja odabranu kapljevину, „v“ odabranu paru/plin, σ_w površinsku napetost između vode i zraka, a σ površinsku napetost odabranog para kapljevina-plin/para.



Slika 16. Baker (1954) mapa strujanja za horizontalne cijevi [4]

3.3.2.2. Mandhane et al. (1974)

Mandhane et al. (1974) [4] jedna je od od najčešće korištenih mapa za istosmjerno strujanje u horizontalnim cijevima.

Ograničenja

Promjer cijevi: 12,7 – 165,1 mm

Gustoća kapljevine: 705 – 1009 kg/m³

Gustoća pare: 0,8 – 50,5 kg/m³

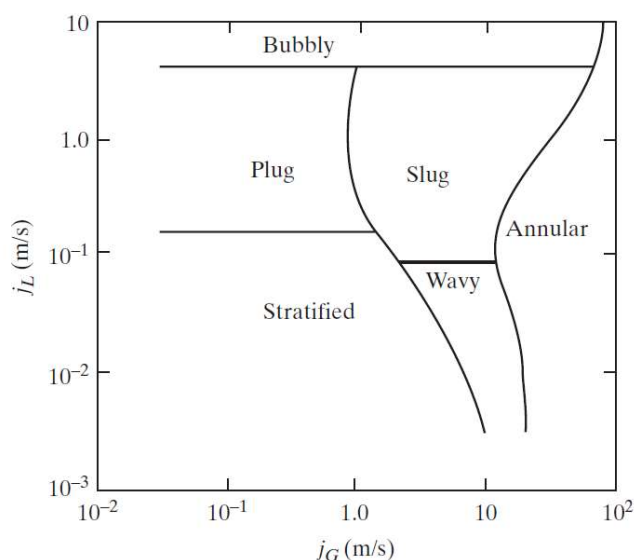
Dinamička viskoznost kapljevine: $3 \cdot 10^{-4}$ – $9 \cdot 10^{-2}$ kg/ms

Dinamička viskoznost kapljevine: 10^{-5} – $2,2 \cdot 10^{-5}$ kg/ms

Površinska napetost: 0,024 – 0,103 N/m

Površinska brzina kapljevine: $0,9 \cdot 10^{-3}$ – 7,31 m/s

Površinska brzina pare: 0,04 – 171 m/s



Slika 17. Mandhane et al. (1974) mapa strujanja za horizontalne cijevi [4]

3.3.2.3. Tandon et al. (1982)

Tandon et al. (1982) [4] mapa za određivanje vrste strujanja je jednostavna i u veoma širokoj upotrebi. Kao parametre koristi bezdimenzijsku površinsku brzinu pare j_g^* i parametar $(1 - a)a$.

Većina podataka za izradu mape dobijena je eksperimentalnim mjerenjem korištenjem radnih tvari R-12 i R-113 u cijevima s unutarnjim promjerom od 4.8-15.9 mm.

Površinska brzina pare

$$j_v^* = \frac{G \cdot x}{[g \cdot d \cdot \rho_v \cdot (\rho_l - \rho_v)]^{0,5}}$$

Smithov izraz

$$a = \left\{ 1 + \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right) \cdot \left(\frac{1-x}{x} \right) \left[0,4 + 0,6 \sqrt{\frac{\frac{\rho_l}{\rho_v} + 0,4 \left(\frac{1-x}{x} \right)}{1 + 0,4 \left(\frac{1-x}{x} \right)}} \right] \right\}^{-1}$$

Parametri

Prskajuće strujanje

$$j_v^* \geq 6; \frac{1-a}{a} \leq 0,5$$

Prstenasto ili polu-prstenasto strujanje

$$1 \leq j_v^* \leq 6; \frac{1-a}{a} \leq 0,5$$

Valovito strujanje

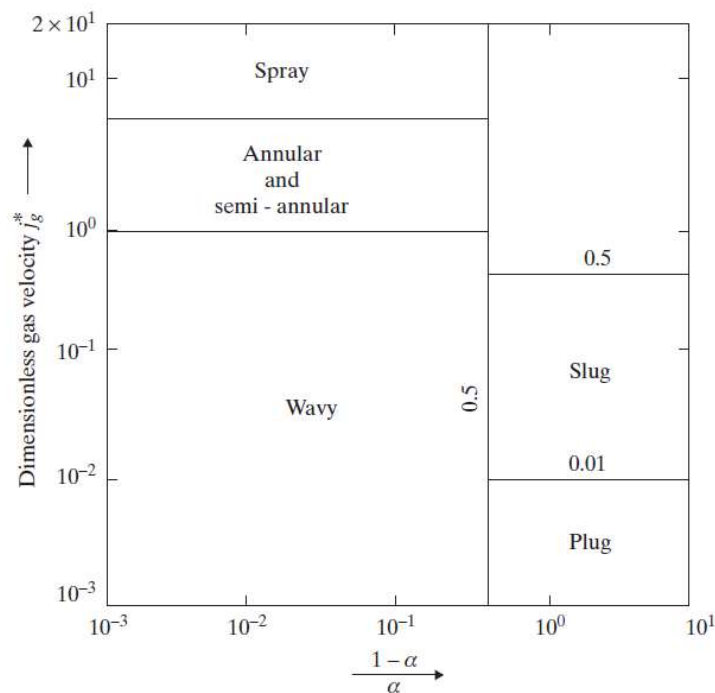
$$1 \leq v_g^*; \frac{1-a}{a} \leq 0,5$$

Slug strujanje

$$0,001 \leq j_v^* \leq 0,5; \frac{1-a}{a} \geq 0,5$$

Plug strujanje

$$j_v^* \leq 0,01; \frac{1-a}{a} \geq 0,5$$



Slika 18. Tandon et al. (1982) mapa strujanja za horizontalne cijevi [4]

3.3.3. Izrazi za izmjenu topline

Kako bi se optimizirala učinkovitost kondenzatora, a time i potrošnja energije, konstantno se razvijaju metode koje bi efikasno i sa što većom točnošću računale koeficijent prijelaza topline tijekom kondenzacije unutar cijevi. U današnje vrijeme, analitička i numerička analiza pružaju određena ograničenja, uzimajući u obzir multidimenzionalnost i kompleksnost dvofaznog strujanja. Iako postoji mnogo izraza za izračun koeficijenta prijelaza topline, niti jedan od njih se ne može koristiti za bilo koju geometriju cijevi, kao ni za bilo koje granične uvjete. Kako bi se odabrao pravi izraz, potrebno je odrediti kakva vrsta strujanja će se pojaviti u pojedinom dijelu cijevi, što ovisi o parametrima kao što su kvaliteta i količina protočne struje, fizikalna svojstva faza, geometrija i nagib cijevi. U svakom strujanju koje se javlja dolazi do različite distribucije kapljevine i plina, što za posljedicu ima različite mehanizme prijenosa topline.

3.3.3.1. Akers et al. (1959)

Akers, Deans i Crosser (1959) [5] predložili su modificiranu vrijednost Diettus-Boelterove jednadžbe, koja je postala poznata kao model „ekvivalentnog Reynoldsova broja“. Ovaj izraz je definiran kao jednofazno strujanje kapljevine koja daje isti koeficijent prijelaza topline kao prstenasto strujanje tijekom kondenzacije unutar horizontalne cijevi.

Ekvivalentna gustoća masenog toka

$$G_{ekv} = G \left[(1 - x) + x \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,5} \right]$$

Ekvivalentni Reynoldsov broj

$$Re_{ekv} = \frac{G_{ekv} \cdot d_u}{\mu_l}$$

Akers uvodi multiplikacijske faktore C i n, koji ovise o veličini Reynoldsova broja za kapljevinu radne tvari koja kondenzira.

Korištenje Akersova modela preporuča se za prstenasti tip strujanja, a neke od testiranih radnih tvari su R-12, R-290 i metanol.

Multiplikacijski faktori

$$C=0,0265$$

$$n=0,8 \quad \text{koji vrijede kada je } Re_{ekv} > 50\,000$$

$$C=5,03$$

$$n=0,33 \quad \text{koji vrijede kada je } Re_{ekv} > 50\,000$$

Koeficijent prijelaza topline

$$\alpha_{AK} = C \cdot \frac{\lambda_l}{d_u} \cdot Re_{ekv}^n \cdot Pr_l^{0,33}$$

3.3.3.2. Cavallini-Zecchin (1971)

Cavallini i Zecchin [6] razvili su polu-empirijsku formulu čiji početni oblik potječe iz teorijske analize koju je koristio Traviss. Također predlažu da se njihova jednadžba može koristiti za izračun prosječnog koeficijenta prijelaza topline između ulaza i izlaza kondenzatora, uzimajući u obzir da termofizikalna svojstva i temperaturna razlika između stijenke cijevi i fluida ne variraju u velikom rasponu.

Neki od testiranih radnih tvari su R-11, R-12, R-21, R-22, R-113, R-114, R-134a, R-410A i R-407C.

Reynoldsov broj za kapljevinu

$$Re_l = \frac{G \cdot (1 - x) \cdot d_u}{\mu_l}$$

Reynoldsov broj za paru

$$Re_v = \frac{G \cdot x \cdot d_u}{\mu_v}$$

Ekvivalentni Reynoldsov broj po Cavallini-Zecchin

$$Re_{ekv,CZ} = Re_v \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\mu_v}{\mu_l}\right) + Re_l$$

Koeficijent prijelaza topline

$$\alpha_{CZ} = 0,05 \cdot \frac{\lambda_l}{d_u} \cdot Re_{ekv,CZ}^{0,8} \cdot Pr_l^{0,33}$$

3.3.3.3. Traviss et al. (1973)

Traviss [7] razvija izraz kao dio istraživanja kondenzacije radnih tvari R-12 i R-22. Izraz je razvijen primjenom momentne i toplinske analogije za prstenasto strujanja. Raspodjela brzine u prstenastom filmu opisana je Van Karmanovim univerzalnim modelom raspodjele brzine, a radijalni gradijenti temperature u parnoj jezgri su zanemareni, te je temperatura isparivanja pretpostavljena na spoju kapljevinu i plina.

Reynoldsov broj za kapljevinu

$$Re_l = \frac{G \cdot (1 - x) \cdot d_u}{\mu_l}$$

Martinellijev parametar

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,9} \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\mu_l}{\mu_v}\right)^{0,1}$$

Bezdimenzijski parametar F_1

$$F_1 = 0,15 \cdot \left[\frac{1}{X_{tt}} + \frac{2,85}{X_{tt}^{0,476}} \right]$$

Bezdimenzijski parametar F_2

$$F_2 = 0,7 \cdot Pr_l \cdot Re_l^{0,5} \text{ vrijedi za } Re_l \leq 50$$

$$F_2 = 5Pr_l + 5\ln(1 + Pr_l \cdot (0,09363 \cdot Re_l^{0,585} - 1)) \text{ vrijedi za } 50 \leq Re_l \leq 1125$$

$$F_2 = 5Pr_l + 5\ln(1 + 5Pr_l) + 2,5\ln(0,00313Re_l^{0,585}) \text{ vrijedi za } Re_l \geq 1125$$

Za izračun koeficijenta prijenosa topline dane su tri vrijednosti bezdimenzijskog parametra F_2 u ovisnosti o vrijednosti Reynoldsova broja kapljevine radne tvari.

Koeficijent prijelaza topline

$$\alpha_{TR} = \frac{\lambda_l}{d_u} \cdot Re^{0,9} \cdot Pr_l \cdot \frac{F_1(X_{tt})}{F_2(Re_l, Pr_l)}$$

3.3.3.4. Shah (1979)

Shah-ov izraz [5] kreće od Dittus-Boelterova izraza, ali predlaže korištenje dvofaznog multiplikatora. Povećavanjem reduciranog tlaka, svojstva kapljevine i pare postaju sve više slična, čime se dvofazni multiplikator povećava. Korištenje Shah-ova modela preporuča se za prstenasto strujanje.

Neke od testiranih radnih tvari su R-11, R-12, R-22, R-113, R-718, metanol, etanol, benzen, toluen i etilen.

Reynoldsov broj za kapljevину

$$Re_l = \frac{G \cdot (1-x) \cdot d_u}{\mu_l}$$

Koeficijent prijelaza topline za kapljevину

$$\alpha_l = 0,023 \cdot \frac{\lambda_l}{d_u} \cdot Re_l^{0,8} \cdot Pr_l^{0,4}$$

Shah umjesto omjera gustoća pare i kapljevine za različite udjele pare koristi reducirani tlak p^* gdje je p_k tlak kondenzacije, a p_{krit} kritični tlak radne tvari.

Reducirani tlak

$$p_r = \frac{p_k}{p_{krit}}$$

Koeficijent prijelaza topline

$$\alpha_{SH} = \alpha_l \left[(1-x)^{0,8} + \frac{3,8 \cdot x^{0,76} \cdot (1-x)^{0,04}}{p_r^{0,38}} \right]$$

3.3.3.5. Tang et al. (1997)

Tang [5] predlaže jednostavan izraz koji je nadogradnja na model Shah-a (1979) i pokriva reducirane tlakove od 0,2-0,53 i gustoće masenog toka od 300 do 800 kg/m²s, te je prilagođena za prstenasto strujanje.

Koeficijent prijelaza topline

$$\alpha_{TG} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_l}{D} \cdot Re_l^{0,8} \cdot Pr_l^{0,33} \left[1 + 4,6863 \left(\frac{-x \cdot \ln p_r}{1-x} \right)^{0,836} \right]$$

3.3.3.6. Dobson-Chato (1998)

Dobson i Chato (1998) [5] predlažu unapređenje Chato-ve (1962) metode koja uključuje valovito-slojevito i prstenasto strujanje.

Reynoldsov broj za kapljevinu

$$Re_l = \frac{G(1-x) \cdot d_u}{\mu_l}$$

Martinellijev parametar

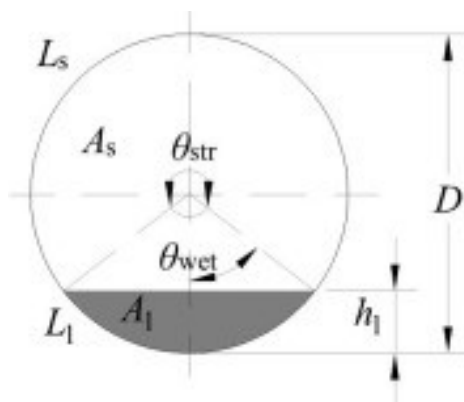
$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,9} \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{0,1}$$

Koeficijent prijelaza topline za prstenasto strujanje

$$\alpha_{DC,prs} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_l}{d_u} \cdot Re_l^{0,8} \cdot Pr_l^{0,4} \left[1 + \frac{2,22}{X_{tt}^{0,89}} \right]$$

Prilikom računanja koeficijenta prijelaza topline u valovitom-slojevitom strujanju, prvo se mora izračunati prazni udio, koji označava dio cijevi u kojemu se nalazi plinovita faza, a u ovom slučaju će se izračunati pomoću Zivi jednadžbe. Uvodi se pretpostavka da je sva kapljevina odvojena na dnu cijevi, zanemarujući kondenzat formiran na stijenkama cijevi, te se određuje kut od vrha cijevi do odvojenog sloja kondenzata.

$$1 - \frac{\theta_{str}}{\pi} \cong \frac{\arccos(2\varepsilon - 1)}{\pi}$$



Slika 19. Udio praznine unutar cijevi

Volumetrički sadržaj pare

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \left[\frac{(1-x)}{x} \right] \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{\frac{2}{3}}}$$

Galileov broj za kapljevina

$$Ga_l = \frac{g \cdot \rho_l \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot d_u^3}{\mu_l^2}$$

Reynoldsov broj za samo paru

$$Re_{vo} = \frac{G \cdot d_u}{\mu_v}$$

Jakobov broj za kapljevinu

$$Ja_l = \frac{g \cdot c_{p,l} \cdot (T_k - T_s) \cdot d_u^3}{r}$$

Freudov broj za kapljevinu

$$Fr_l = \frac{G^2}{\rho_l^2 \cdot g \cdot d_u}$$

Prisilna konvekcija u valovito-slojevitom dijelu

$$Nu_{vs} = 0,0195 \cdot Re_l^{0,8} \cdot Pr_l^{0,33} \left(1,376 + \frac{c_1}{X_{tt}^{c_2}} \right)^{0,5}$$

Konstante c_1 i c_2 funkcija su Freudovog broja

1) Za $0 < Fr_l < 0,7$ vrijedi:

$$c_1 = 4,172 + 5,48Fr_l - 1,564Fr_l^2$$

$$c_2 = 1,773 - 0,169Fr_l$$

1) Za $Fr_l > 0,7$ vrijedi

$$c_1 = 7,242$$

$$c_2 = 1,655$$

Koeficijent prijelaza topline za valovito-slojevito strujanje

$$\alpha_{DC,vs} = \frac{\lambda_l}{d_u} \frac{0,23 \cdot Re_{vo}^{0,12}}{1 + 1,11X_{tt}^{0,58}} \left[\frac{Ga_l \cdot Pr_l}{Ja_l} \right]^{0,25} + \left(1 - \frac{\theta_{str}}{\pi}\right) Nu_{str}$$

Za određivanje mjesta prelaska iz stratificiranog-valovitog strujanja u prstenasto strujanje koristi se Solimanov tranzicijski kriterij. Solimanova metoda je temeljena na Freudovom tranzicijskom broju Fr_{so} koji je izražen kao:

1) $Re_l \leq 1250$

$$Fr_{so} = 0,025 \cdot Re_l^{1,59} \left[\frac{1 + 1,09X_{tt}^{0,039}}{X_{tt}} \right]^{1,5} \cdot \frac{1}{Ga_l}$$

2) $Re_l > 1250$

$$Fr_{so} = 1,26 \cdot Re_l^{1,04} \left[\frac{1 + 1,09X_{tt}^{0,039}}{X_{tt}} \right]^{1,5} \cdot \frac{1}{Ga_l}$$

Soliman predviđa prelazak iz valovitog-slojevitog u prstenasto strujanje za vrijednost $Fr_{so} = 7$, međutim Dobson i Chato predlažu vrijednost $Fr_{so} = 20$ radi boljih slaganja s eksperimentalnim rezultatima.

Ova metoda nema blag prelazak iz valovitog-slojevitog u prstenasto strujanje, već daje veliku razliku u rezultatima koja nije opažena eksperimentalno. Nekontinuiranost koeficijenta prijelaza topline u prijelaznom području između dviju vrsta strujanja može se riješiti linearizacijom baziranom na Fr_{so} .

3.3.3.7. VDI Heat Atlas

Proračun potrebne površine A i duljine cijevi L prati preporuke VDI Heat Atlasa [8]. Neke od uvedenih pretpostavki potrebnih za proračun su:

$$1) 1 - \frac{\rho_v}{\rho_l} \approx 1; f_n \approx 1; \delta_F^+ \ll d_u$$

2) Relativna brzina između kondenzata i pare je približna apsolutna brzina pare,

a smično naprezanje pare je zanemareno.

3) Maseni tok u smjeru normale na stijenku cijevi je zanemaren.

Kako bi se došlo do koeficijenta prijelaza topline potrebno je slijediti proračun po sljedećem redoslijedu, računajući zadane veličine za svaki sadržaj pare.

Maseni protok pare

$$q_{m,v} = x \cdot q_{m,uk}$$

Maseni protok kapljevine

$$q_{m,l} = (1 - x) \cdot q_{m,uk}$$

Reynoldsov broj za paru

$$Re_v = \frac{q_{m,v}}{d_u \cdot \pi \cdot \mu_v}$$

Reynoldsov broj za kapljevину

$$Re_l = \frac{q_{m,l}}{d_u \cdot \pi \cdot \mu_l}$$

Parametar strujanja F

$$F = \frac{\max((2Re_l)^{0,5}; 0,132Re_l^{0,9})}{Re_v^{0,9}} \cdot \frac{\mu_l}{\mu_v} \cdot \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_l}}$$

Volumetrički sadržaj pare

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{8,48F}}$$

Debljina filma

$$\delta_F^+ = 0,25 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot d$$

Karakteristična duljina filma kondenzata

$$L_{kar} = \left(\frac{\mu_l^2}{g \cdot \rho_l^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Laminarni Nusseltov broj

$$Nu_{l,lm} = 0,7 \cdot Re_l^{-0,29}$$

Turbulentni Nusseltov broj

$$Nu_{l,t} = \frac{0,0283 \cdot Re_l^{0,292} \cdot Pr_l^{0,333}}{1 + 9,66 \cdot Re_l^{-0,375} \cdot Pr_l^{-0,167}}$$

Ukupni Nusseltov broj

$$Nu_{uk} = \sqrt{Nu_{l,m}^2 + Nu_{l,t}^2}$$

Brzina pare

$$u_v = \frac{4 \cdot q_{m,v}}{\rho_v \cdot \pi \cdot (d_u - 2\delta_F^+)^2}$$

Faktor trenja

1) Glatke cijevi

$$f_g = 0,184 \cdot Re_v^{-0,2}$$

2) Hrapave cijevi

$$f_r = f_g(1 + 850F)$$

Smično naprezanje

$$\tau_D = 0,125 \cdot \xi_r \cdot \rho_v \cdot u_v^2$$

Korekcija za smična naprezanja

$$K_W = \left(\frac{\tau_v}{\rho_l \cdot g \cdot \delta_F^+} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Koeficijent prijelaza topline

$$\alpha_{VDI} = \frac{K_W \cdot Nu_{uk} \cdot \lambda_l}{L_{kar}}$$

3.3.4. Usporedba izraza za izmjenu topline

Računanje koeficijenta prijelaza topline tijekom kondenzacije preko različitih autora daje različite rezultate za istu geometriju cijevi i narinute uvjete. Prilikom usporedbe kao radna tvar korišten je propan (R290), a kao rashladni medij voda.

Izrazi za izmjenu topline su simulirani u programu Excel, počevši od sadržaja pare $x = 0,01$ do $x = 0,99$, s korakom $\Delta x = 0,01$.

Interval sadržaja pare

$$x = 0,01 - 0,99$$

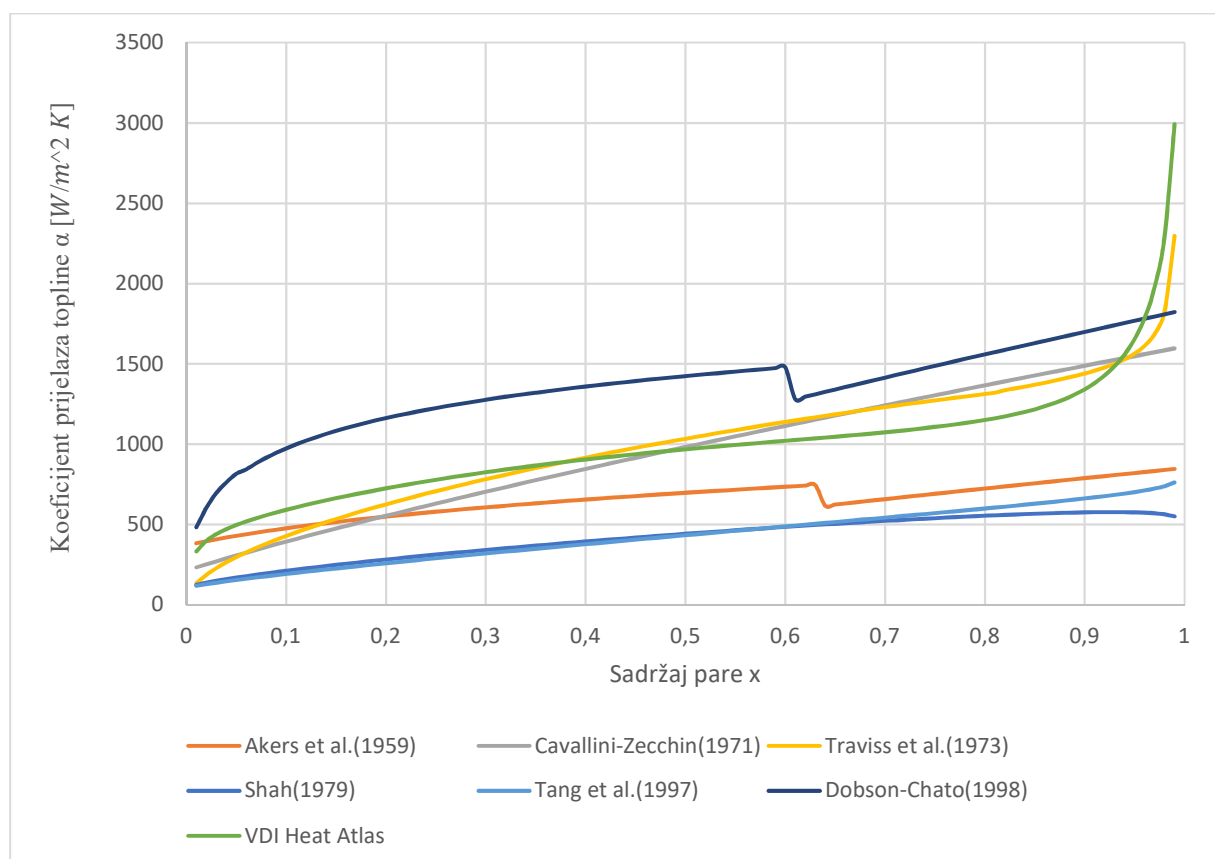
Geometrija i broj cijevi, gustoća masenog toka, koeficijent prijelaza topline na strani rashladne vode i način proračuna potrebne površine za izmjenu topline korištene u analizi izmjene izračunate su i objašnjene u poglavlju 4.1.5.

Unutarnji promjer cijevi

$$d_{u,cij} = 25 \text{ mm}$$

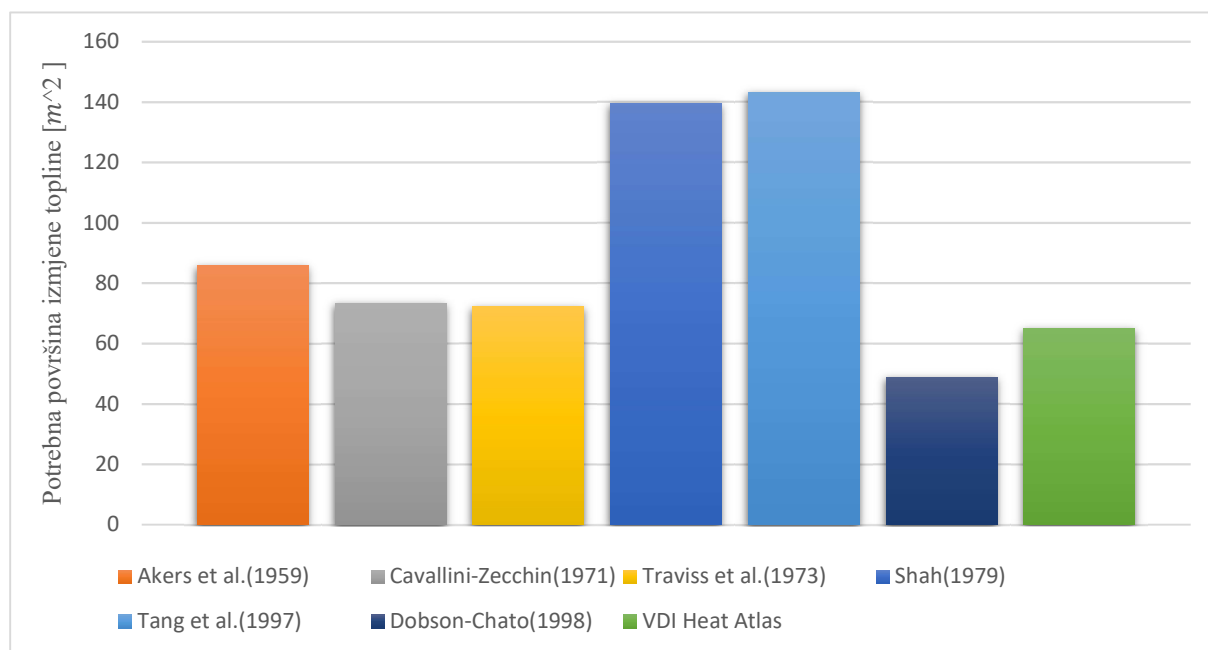
Gustoća masenog toka za jednu cijev

$$G_{cij} = 16,6 \text{ kg/m}^2\text{s}$$



Slika 20. Grafički prikaz koeficijenta prijelaza topline za različite autore u funkciji sadržaja pare

Koeficijenti prijelaza topline prikazani su u funkciji sadržaja pare. Može se primjetiti kako se koeficijent prijelaza topline povećava sa sadržajem pare. To se može objasniti na način da, kada para ulazi u kondenzator, na unutarnjim stijenkama cijevi ima najmanje kondenzata, a samim time i najmanje toplinskog otpora. Smanjivanjem sadržaja pare dolazi do nastanka više kondenzata, što povećava toplinski otpor i smanjuje koeficijent prijelaza topline. Na sadržaju pare $x \approx 0,6$ dolazi do nagle promjene koeficijenta prijelaza topline kod izraza Dobson-Chato (1998), te se može zaključiti da je na tom mjestu strujanje prešlo iz prstenastog u valovito-slojevito (prilikom usporedbe izraza kao tranzicijski broj je uzeta vrijednost $Fr_{so} = 7$). Potrebna površina za izmjenu topline prvo je izračunata za jednu cijev, a vrijednosti su zatim pomnožene s brojem cijevi u izmjenjivaču.



Slika 21. Grafički prikaz potrebnih površina izmjene topline za različite autore

Blago povećana potrebna površina za izmjenu topline za proračun prema VDI Heat Atlas u usporedbi različitih izraza za koeficijente prijelaza topline i onoj izračunatoj u 4.1.5 može se pridodati korištenju različitog koraka između koordinata sadržaja pare prilikom tabličnog proračuna.

3.4. Pad tlaka u horizontalnim cijevima

U mnogim sustavima važan parametar pri projektiranju je pad tlaka dvofaznog strujanja. To je pogotovo važno kod kondenzatora, gdje je lokalna temperatura kondenzacije funkcija lokalnog tlaka, što utječe na srednju logaritamsku temperaturu unutar izmjenjivača. U industriji, preporučeni pad tlaka ne bi trebao biti veći od $\pm 10\%$ od projektnog tlaka kondenzacije.

Pad tlaka unutar cijevi konstantnog presjeka uključuje, po redu unutar jednadžbe ukupnog pada tlaka, pad tlaka zbog trenja, ubrzanja protoka i gravitacije.

$$-\left[\frac{dp}{dz}\right] = -\left[\frac{dp}{dz}\right]_f - \left[\frac{dp}{dz}\right]_a - \left[\frac{dp}{dz}\right]_g$$

Prilikom ove analize, padovi tlaka izazvani ubrzanjem protoka i gravitacijom će se zanemariti, tako da će ukupan pad tlaka biti jednak onome koje izaziva trenje.

$$\left[\frac{dp}{dz}\right]_a = \left[\frac{dp}{dz}\right]_g = 0$$

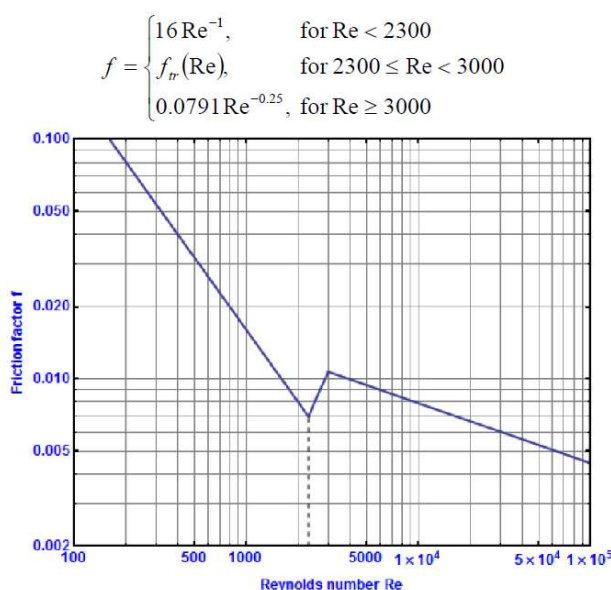
$$-\left[\frac{dp}{dz}\right]_{s\&t} = -\left[\frac{dp}{dz}\right]_f$$

3.4.1. Fanningov faktor otpora

Svi izrazi koji se koriste u usporedbi padova tlaka u cijevi tijekom kondenzacije koriste Fanningov faktor otpora kao relevantnu tijekom proračuna.

Definicija Fanningova faktora otpora

$$f = \frac{2 \cdot \tau_w}{\rho \cdot u^2}$$



Slika 22. Fanningov faktor otpora za hidraulički glatke cijevi u funkciji Re [9]

Fanningov faktor otpora u poveznici s Darcy-Weisbach faktorom otpora

$$\lambda_{DW} = 4 \cdot f$$

Za hidraulički glatke cijevi pri jednofaznom strujanju Fanningov faktor otpora može se predvidjeti pomoću relacije Hagen-Poiseuille za laminarno strujanje i pomoću Blasiusove relacije za turbulentno strujanje, dok se između dva režima može odrediti linearnom aproksimacijom.

Linearna aproksimacija između laminarnog i turbulentnog strujanja [9]

$$f_{tr}(Re) = f_{lm, Re=2300} + \frac{(f_{t, Re=30} - f_{lm, Re=2300})}{3000 - 2300} \cdot (Re - 2300)$$

3.4.2. Homogeni model

U homogenom modelu [9], dvofazno strujanje je prikazano kao ekvivalentno jednofazno strujanje jednostavnim osrednjavanjem fizikalnih svojstava pare i kapljevine za određeni sadržaj pare.

Gustoća dvofazne mješavine

$$\rho_H = \left(\frac{x}{\rho_v} + \frac{1-x}{\rho_l} \right)^{-1}$$

Reynoldsov broj za dvofaznu mješavinu

$$Re = \frac{G \cdot d}{\mu_H}$$

Dinamička viskoznost mješavine prema McAdamsu [10]

$$\mu_H = \left(\frac{x}{\mu_v} + \frac{1-x}{\mu_l} \right)^{-1}$$

$$f = \begin{cases} 16 Re^{-1}, & \text{for } Re < 2000 \\ 0.079 Re^{-0.25}, & \text{for } 2000 \leq Re < 20000 \\ 0.046 Re^{-0.2}, & \text{for } Re \geq 20000 \end{cases}$$

Slika 23. Fanningov faktor otpora u funkciji Re za homogeni model [9]

3.4.3. Heterogeni model

Lockhart i Martinelli (1949) [9] predlažu koncept dvofaznih množitelja za kapljevinu ϕ_l^2 i paru ϕ_v^2 . Model je razvijen eksperimentalnim ispitivanjem dvofaznog strujanja zraka i različitih kapljevina, među kojima su benzen, voda i razna ulja u cijevima različiti promjera. U proračunu pada tlaka vrijednost dvofaznih množitelja dobije se slijedom formula omogućenih od različitih autora, koristeći jedinični pad tlaka kapljevine, pare, samo kapljevine i samo pare.

Jedinični pad tlaka kapljevine

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_l = \frac{2 \cdot f_l \cdot G^2 \cdot (1-x)^2}{\rho_l \cdot d}$$

Jedinični pad tlaka pare

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_v = \frac{2 \cdot f_v \cdot G^2 \cdot x^2}{\rho_v \cdot d}$$

Jedinični pad tlaka samo kapljevine

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{lo} = \frac{2 \cdot f_{lo} \cdot G^2}{\rho_l \cdot d}$$

Jedinični pad tlaka samo pare

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{vo} = \frac{2 \cdot f_{vo} \cdot G^2}{\rho_v \cdot d}$$

Prilikom računanja faktora otpora treba obratiti pažnju na indekse. Indeks „lo“ označava samo kapljevinu, a indeks „vo“ samo paru. Kod računanja Reynoldsova broja za ove veličine nije potrebno vršiti korekciju sa sadržajem pare x , već se u brojniku nalazi konstantna vrijednost gustoće masenog toka.

3.4.3.1. Chisholm (1967)

Chisholm (1967) [11] razvija relaciju za pad tlaka za mješavinu plin-kapljevina ili para-kapljevina. Vrijednosti koeficijenta C ovise o vrsti strujanja koja se javlja u pojedinoj fazi.

Ukupan jedinični pad tlaka

$$\left(\frac{dp}{dz}\right) = \left(\frac{dp}{dz}\right)_l \cdot \phi_l^2 = \left(\frac{dp}{dz}\right)_v \cdot \phi_v^2$$

Parametar X

$$X^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_l}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_v}$$

Dvofazni množitelj za kapljevinu

$$\phi_l^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}$$

Dvofazni množitelj za paru

$$\phi_v^2 = 1 + C \cdot X + X^2$$

Chisholmov parametar

$$C = \begin{cases} 5, & \text{for } Re_L < 1500 \text{ and } Re_G < 1500 (V-V \text{ case}) \\ 10, & \text{for } Re_L > 1500 \text{ and } Re_G < 1500 (T-V \text{ case}) \\ 12, & \text{for } Re_L < 1500 \text{ and } Re_G > 1500 (V-T \text{ case}) \\ 20, & \text{for } Re_L > 1500 \text{ and } Re_G > 1500 (T-T \text{ case}) \end{cases}$$

Slika 24. Chisholmov parametar C [9]

3.4.3.2. Jung & Radermacher (1989)

Njihov pristup koristi dvofazni multiplikator za samo kapljevino, koji je dan kao funkcija sadržaja pare i Martinellijskog parametra [9].

$$\phi_{lo}^2 = 12,82 \cdot X_{tt}^{-1,47} \cdot (1 - x)^{1,8}$$

3.4.3.3. VDI Heat Atlas

Faktor otpora se računa prema Henstocku i Hanratty-u [8].

Faktor otpora za glatke cijevi

$$f_g = 0,184 \cdot Re_v^{-0,2}$$

Faktor otpora za hrapave cijevi

$$f_r = f_g(1 + 850F)$$

Potrebne formule za smično naprezanja τ_D i debljinu filma kondenzata δ_F^+ prikazane su u poglavlju 3.3.3.7.

Pad tlaka

$$\Delta p_{1-2} = \frac{\tau_x + \tau_{x+\Delta x}}{2} \cdot \frac{4 \cdot \Delta L}{d - (\delta_x^+ + \delta_{x+\Delta x}^+)}$$

3.4.4. Usporedba izraza za pad tlaka

U usporedbi izraza za pad tlaka korištene su duljine cijevi između različitih koordinata sadržaja pare izračunate u kasnijem proračunu u poglavlju 4.1.5. konstruiranja Shell&Tube izmjenjivača topline.

Izrazi koji se odnose na homogeni model, jednofazna strujanja kapljevine i pare (kao i samo kapljevine i samo pare) te izrazi za izračun dvofaznih množitelja izračunati su za srednji

sadržaj pare između dviju koordinata sadržaja pare čime se dobije ukupan jedinični pad tlaka na pojedinom dijelu, koji pomnožen s duljinom izražava konačan pad tlaka tog dijela.

Izrazi za izmjenu topline su simulirani u programu Excel, počevši od sadržaja pare $x = 0,01$ do $x = 0,99$, s korakom $\Delta x = 0,1$.

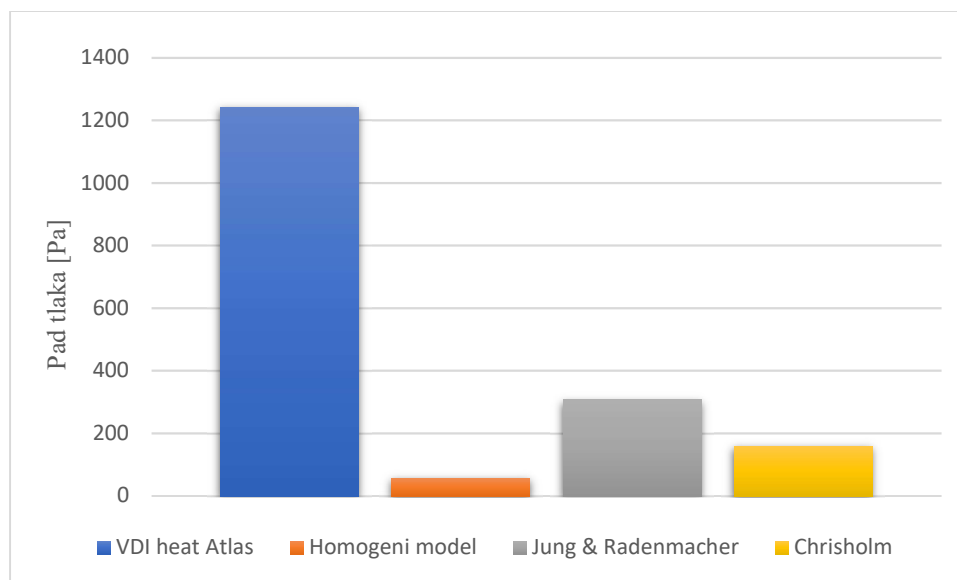
Geometrija ,broj cijevi i gustoća masenog toka dane su u poglavlju 4.1.

Unutarnji promjer cijevi

$$d_{u,cij} = 25 \text{ mm}$$

Gustoća masenog toka za jednu cijev

$$G_{cij} = 16,6 \text{ kg/m}^2\text{s}$$



Slika 25. Grafički prikaza pada tlaka za različite autore

Iz priloženog grafičkog prikaza može se primjetiti kako pad tlaka kod proračuna preko VDI Heat Atlasa daje višestruko veće vrijednosti za razliku od ostalih modela, što se može pridodati korištenju faktora otpora za hidraulički hrapave cijevi tijekom termodinamičkog proračuna izmjenjivača, dok se ostali modeli u usporedbi pada tlaka odnose na hidraulički glatke cijevi.

4. KONSTRUIRANJE SHELL&TUBE KONDENZATORA

4.1. Termodinamički proračun

Kondenzator će biti izveden kao izmjenjivač topline s U-cijevima, pri čemu će se kondenzacija odvijati unutar snopa cijevi, a rashladna voda će strujati oko cijevi unutar plašta i između segmentnih pregrada.

4.1.1. Odabir cijevi izmjenjivača

Kao materijal cijevi odabran je bakar Cu Zn 37.00 [12]

$$\lambda_{Cu} = 372 \frac{W}{mK}$$

Geometrijske karakteristike [13]

Vanjski promjer cijevi

$$d_{v,cij} = 28 \text{ mm}$$

Unutarnji promjer cijevi

$$d_{u,cij} = 25 \text{ mm}$$

Debljina stijenke cijevi

$$s_{cij} = 1,5 \text{ mm}$$

4.1.2. Potreban broj cijevi

Površina unutarnjeg presjeka cijevi

$$A_{u,cij} = \frac{d_u^2 \cdot \pi}{4}$$

$$A_{u,cij} = \frac{0,025^2 \cdot \pi}{4}$$

$$A_{u,cij} = 0,0004908 \text{ m}^2$$

Pretpostavljena brzina na ulazu u cijevi

$$w_{pret,para,ul} = 5,5 \text{ m/s}$$

Odgovarajući volumni protok na ulazu po jednoj cijevi

$$q_{v,para,ul,cij} = w_{pret,para,ul} \cdot A_{u,cij}$$

$$q_{v,para,ul,cij} = 5,5 \cdot 0,0004908$$

$$q_{v,para,ul,cij} = 0,002699 \text{ m}^3/\text{s}$$

Potreban broj cijevi

$$N_{cij} = \frac{q_{v,para}}{q_{v,para,ul,cij}}$$

$$N_{cij} = \frac{0,324}{0,002699}$$

$$N_{cij} = 120,01$$

Odabran broj cijevi

$$N_{cij} = 120$$

4.1.3. Koeficijent prijelaza topline na strani rashladne vode

Proračun koeficijenta prijelaza topline s vanjske strane cijevi (u plaštu) provesti će se prema Donohuea-u [14]

Promjer segmentnih pregrada je dijametralno manji od unutarnjeg promjera plašta za 4 mm prema preporukama VDI Heat Atlas [8].

Shell diameter d_i	Diametric Clearance
≤ 400	3
450–1000	4
> 1000	6

Slika 26. Preporučeni promjer segmentnih pregrada u ovisnosti o promjeru plašta [8]

Promjer segmentnih pregrada

$$D_s = 684 \text{ mm}$$

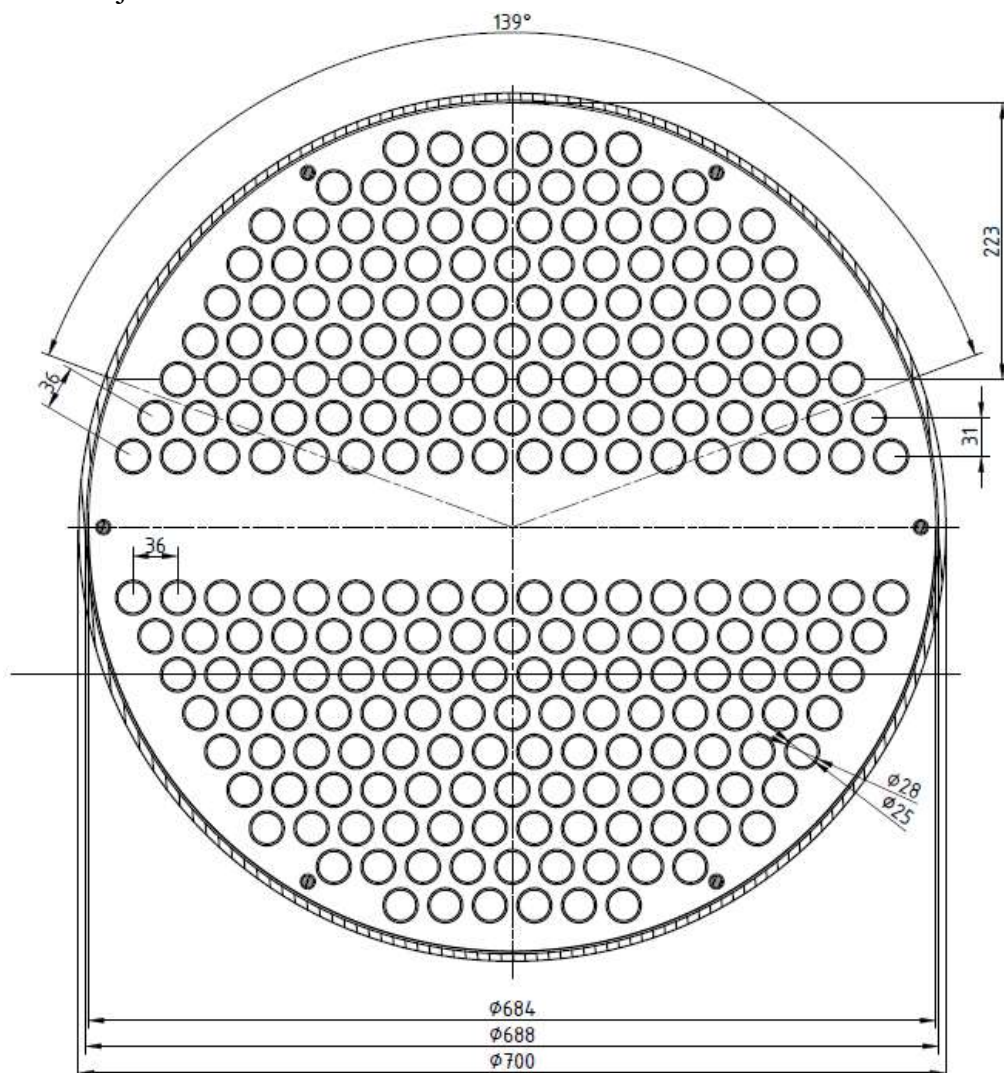
Razmak između segmentnih pregrada unutar izmjenjivača

$$L_M = 250 \text{ mm}$$

Postupak po Donohue-u se može koristiti ako je zadovoljen sljedeći uvjet

$$L_M = 250 \text{ mm} > 0,2 \cdot D_U = 0,5 \cdot 688 = 137,6 \text{ mm}$$

Uvjet je zadovoljen.



Slika 27. Presjek izmjenjivača s rasporedom cijevi unutar plašta

Konstruktivske veličine:

Središnji kut $\gamma [^\circ]$

$$\gamma = 139^\circ$$

Središnji kut $\gamma [rad]$

$$\gamma = 2,426 \text{ rad}$$

Visina odsječka pregrade

$$H = 223 \text{ mm}$$

Broj cijevi u uzdužnoj zoni

$$N_U = 77$$

Stvarni slobodni presjek strujanja u uzdužnoj zoni

$$S_U = \frac{D_u^2}{8} \cdot (\gamma - \sin \gamma) - N_U \cdot \frac{d_v^2 \cdot \pi}{4} =$$

$$S_U = \frac{0,688^2}{8} \cdot (2,426 - \sin 2,426) - 77 \cdot \frac{0,028^2 \cdot \pi}{4} =$$

$$S_U = 0,05731 \text{ m}^2$$

Slobodni presjek za uzdužno strujanje u segmentnom odsječku mora se nalaziti između vrijednosti S_{u1} i S_{u2} .

$$S_{u1} = 0,15 \cdot \frac{D_u^2 \cdot \pi}{4} = 0,15 \cdot \frac{0,688^2 \cdot \pi}{4} = 0,05576 \text{ m}^2$$

$$S_{u2} = 0,2 \cdot \frac{D_u^2 \cdot \pi}{4} = 0,2 \cdot \frac{0,688^2 \cdot \pi}{4} = 0,07435 \text{ m}^2$$

Provjera

$$S_{u1} = 0,05576 \text{ m}^2 < S_U = 0,05731 < S_{u2} = 0,07435 \text{ m}^2$$

Uvjet je zadovoljen.

Broj cijevi u prvom redu

$$N_1 = 18$$

Najuži presjek strujanja u međuzoni

$$S_M = (D_u - N_1 \cdot d_{v,cij}) \cdot L_M$$

$$S_M = (0,688 - 18 \cdot 0,028) \cdot 0,25$$

$$S_M = 0,046 \text{ m}^2$$

Ekvivalentni presjek za određivanje brzine strujanja

$$S_D = \sqrt{S_U \cdot S_M}$$

$$S_D = \sqrt{0,05731 \cdot 0,46}$$

$$S_D = 0,05134 \text{ m}^2$$

Brzina strujanja vode u plaštu

$$w_w = \frac{q_{v,w}}{S_D}$$

$$w_w = \frac{0,0144}{0,05134}$$

$$w_w = 0,28 \text{ m/s}$$

Reynoldsov broj za strujanje vode u plaštu

$$Re_w = \frac{\rho_2 \cdot w_w \cdot d_v}{\eta_w}$$

$$Re_w = \frac{995,54 \cdot 0,28 \cdot 0,028}{0,0007889}$$

$$Re_w = 9923,23$$

Konstanta C

$$C = 0,22 \text{ (neobrađivani plašt) [14]}$$

Nusseltov broj u plaštu

$$Nu_w = C \cdot Re_w^{0,6} \cdot Pr_w^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_w = 0,22 \cdot 9923,23^{0,6} \cdot 5,349^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_w = 96,2$$

Koeficijent prijelaza topline u plaštu

$$\alpha_v = \frac{Nu_w \cdot \lambda_w}{d_v}$$

$$\alpha_v = \frac{96,2 \cdot 0,6164}{0,28}$$

$$\alpha_v = 2117,79 \text{ W/m}^2\text{K}$$

4.1.4. Koeficijent prijelaza topline s vanjske strane stijenke

Proračun potrebne duljine cijevi provest će se tablično prema preporukama VDI Heat Atlas [8] za različite sadržaje pare prema 3.3.3.7 da bi dobili izlazne podatke potrebne za izračun

potrebne površine izmjene topline (koeficijenti prijelaza topline s unutrašnje strane cijevi, koeficijenti prolaza topline, te srednji koeficijent prolaza topline između dviju koordinata sadržaja pare).

Ovdje će se tablično prikazati najvažnije vrijednosti koje vode do potrebne površine izmjene topline, a time i duljine izmjenjivača.

Korak između dviju koordinata sadržaja pare je $\Delta x = 0,1$, osim za prvu i zadnju dionicu gdje je $\Delta x = 0,09$, jer pri $x = 0$ i $x = 1$ neki od međurezultata daju neodređene vrijednosti.

Nakon određivanja koraka koordinata sadržaja pare, te izračuna koeficijenta prijelaza topline na unutarnjoj strani cijevi za svaku zadanu koordinatu sadržaja pare, prethodno dobivenim koeficijentom prijelaza topline na strani rashladne vode, zadanom debljinom stijenke cijevi toplinskom provodnošću materijala cijevi (bakar) dobijemo koeficijent prolaza topline.

Koeficijent prolaza topline

$$k_x = \left(\frac{1}{\alpha_{u,x}} + \left(\frac{s}{\lambda_{Cu}} \right) + \frac{1}{\alpha_{v,x}} \right)^{-1}$$

(Napomena: Koeficijent prolaza topline izračunat je prema zadanoj formuli koja slijedi proračun u VDI Heat Atlasu [8], iako se može svesti na vanjsku ili unutarnju stijenku)

Sljedeći korak je zbrajanje koeficijenata za dvije susjedne koordinate sadržaja pare, te njihovo aritmetičko osrednjavanje.

Srednji koeficijent prolaza topline između dva sadržaja pare

$$\bar{k} = \frac{k_x + k_{x+\Delta x}}{2}$$

Geometrija cijevi izmjenjivača je određena promjerom cijevi, a prilikom proračuna će se računati potrebna površina za izmjenu topline. Između dviju koordinata sadržaja pare u jednoj cijevi uspostavlja se toplinska bilanca između topline koja nastaje kondenzacijom i umnoška potrebne površine izmjene topline, koeficijenta prolaza topline na tom dijelu i srednje logaritamske temperaturne razlike. Dijeljenjem dobivene površine sa opsegom cijevi dobit ćemo duljinu na tom dijelu, a ponavljajući proračun između svih zadanih koordinata pare, te sumiranjem dobivenih duljina, dobit ćemo ukupnu potrebnu duljinu. Tablični proračun je preporučeno početi od najniže vrijednosti sadržaja pare x kako bi se dobile pozitivne vrijednosti duljina ΔL .

Potrebna duljina cijevi

$$\Delta L_{\Delta x} = \frac{\Delta q_{m,kond,12} \cdot r}{\pi \cdot d_u \cdot k \cdot \Delta \vartheta_m}$$

$$\Delta L_{\Delta x} = \frac{(q_{m,kond,x} - q_{m,kond,x+\Delta x}) \cdot r}{\pi \cdot d_u \cdot k \cdot \Delta \vartheta_m}$$

Sadržaj pare	Maseni protok kondenzata	Koeficijent prijelaza topline	Koeficijent prolaza topline	Srednji koeficijent prolaza topline	Duljina cijevi
$x[kg/kg]$	$q_{m,kond}[kg/s]$	$\alpha_u[W/m^2K]$	$k[W/m^2K]$	$\bar{k}[W/m^2K]$	$\Delta L[m]$
0,01	0,008075	371,59	315,72	382,40	0,8076
0,10	0,007341	571,23	449,07	478,91	0,7165
0,20	0,006525	671,41	508,74	530,03	0,6474
0,30	0,005710	747,60	551,32	567,51	0,6046
0,40	0,004894	808,43	583,71	596,59	0,5752
0,50	0,004078	858,73	609,48	620,73	0,5528
0,60	0,003263	904,06	631,98	644,19	0,5327
0,70	0,002447	954,89	656,40	674,31	0,5089
0,80	0,001631	1032,63	692,22	733,13	0,4680
0,90	0,000816	1225,95	774,04	983,59	0,3140
0,99	0,000082	2763,10	1193,13	Zbroj duljina $\Delta L = 5,727 m$	

Tablica 1. Tablični proračun koeficijenata prijelaza , prolaza topline i potrebne duljine cijevi

4.1.5. Potrebna površina izmjene topline i ukupna duljina izmjenjivača

Potrebna površina za izmjenu topline

$$A_{pot} = \Delta L \cdot d_u \cdot \pi$$

$$A_{pot} = \Delta L \cdot d_u \cdot \pi \cdot N_{cij}$$

$$A_{pot} = 5,727 \cdot 0,025 \cdot \pi \cdot 120$$

$$A_{pot} = 53,97 m^2$$

Ekvivalentni koeficijent prolaza topline

$$k_{ekv} = \frac{\Phi}{A_{pot} \cdot \Delta \vartheta_m}$$

$$k_{ekv} = \frac{300\,000}{53,97 \cdot 9,276}$$

$$k_{ekv} = 599,25 W/m^2K$$

Potrebna duljina s dva prolaza (U-cijev)

$$\Delta L_{U-cijev} = \frac{\Delta L}{2}$$

$$\Delta L_{U-cijev} = \frac{5,727}{2}$$

$$\Delta L_{U-cijev} = 2,8638 \text{ m}$$

Uvjet za izmjenjivače topline

$$3 < \frac{\Delta L_{U-cijev}}{D_v} < 7$$

$$3 < \frac{2,8638}{0,7} < 7$$

$$3 < 4,09 < 7$$

Uvjet je zadovoljen.

4.2. Maseni i volumni protoci medija

4.2.1. Maseni i volumni protok pare radne tvari

Maseni protok pare radne tvari

$$q_{m,para} = \frac{\Phi}{r} = \frac{300}{306,493} = 0,9788 \text{ kg/s}$$

Volumni protok pare radne tvari

$$q_{v,para} = \frac{q_{m,para}}{\rho''} = \frac{0,9788}{3,02} = 0,324 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.2.2. Maseni i volumni protoci kondenzata radne tvari

Maseni protok kondenzata radne tvari

$$q_{m,kond} = q_{m,para} = 0,9788 \text{ kg/s}$$

Volumni protok kondenzata radne tvari

$$q_{v,kond} = \frac{q_{m,kond}}{\rho'} = \frac{0,9788}{476,3} = 0,002094 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.2.3. Maseni i volumni protok rashladne vode

Maseni protok rashladne vode

$$q_{m,w} = \frac{\Phi}{c_{p,w} \cdot (\vartheta_{izlaz} - \vartheta_{ulaz})} = \frac{300}{4,1796 \cdot (33 - 28)} = 14,355 \text{ kg/s}$$

Volumni protok rashladne vode

$$q_{v,w} = \frac{q_{m,w}}{\rho_w} = \frac{14,355}{995,54} = 0,0144 \text{ kg/s}$$

4.3. Dimenzioniranje priključaka

4.3.1. Dimenzioniranje priključka za dovod pare radne tvari

Pretpostavljena brzina strujanja pare

$$w_{pret,para} = 10 \text{ m/s}$$

Unutarnji promjer priključka za pretpostavljenu brzinu

$$d_{u,pr,para} = 1000 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot q_{v,pare}}{w_{pret,para} \cdot \pi}} = 1000 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 0,324}{10 \cdot \pi}} = 203,11 \text{ mm}$$

Odabrana čelična bešavna cijev DN200 [13].

Unutarnji promjer:

$$d_{u,pr,para} = 207,9 \text{ mm}$$

Unutarnji promjer:

$$d_{v,pr,para} = 219,1 \text{ mm}$$

Debljina stijenke:

$$s_{pr,para} = 5,6 \text{ mm}$$

Stvarna brzina strujanja pare za odabrani priključak

$$w_{pr,para} = \frac{4 \cdot q_{v,pare}}{d_{u,pr,para} \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 0,324}{0,2079^2 \cdot \pi} = 9,54 \text{ m/s}$$

Na priključak se zavaruje odgovarajuća prirubnica s grlom za zavarivanje DN200 [17].

4.3.2. Dimenzioniranje priključka za odvod kondenzata radne tvari

Pretpostavljena brzina strujanja kondenzata

$$w_{pret,kond} = 1 \text{ m/s}$$

Unutarnji promjer priključka za pretpostavljenu brzinu

$$d_{u,pr,kond} = 1000 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot q_{v,kond}}{w_{pret,kond} \cdot \pi}} = 1000 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 0,002094}{1 \cdot \pi}} = 51,64 \text{ mm}$$

Odabrana čelična bešavna cijev DN65 [13].

Unutarnji promjer:

$$d_{u,pr,kond} = 70,3 \text{ mm}$$

Unutarnji promjer:

$$d_{v,pr,kond} = 76,1 \text{ mm}$$

Debljina stijenke:

$$s_{pr,kond} = 2,9 \text{ mm}$$

Stvarna brzina strujanja pare za odabrani priključak

$$w_{pr,kond} = \frac{4 \cdot q_{v,kond}}{d_{u,pr,kond} \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 0,002094}{0,0703^2 \cdot \pi} = 0,5396 \text{ m/s}$$

Na priključak se zavaruje odgovarajuća prirubnica s grlom za zavarivanje DN65 [17].

4.3.3. Dimenzioniranje priključka za dovod/odvod rashladne vode

Pretpostavljena brzina strujanja rashladne vode

$$w_{pret,w} = 2,5 \text{ m/s}$$

Unutarnji promjer priključka za pretpostavljenu brzinu

$$d_{u,pr,w} = 1000 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot q_{v,w}}{w_{pret,w} \cdot \pi}} = 1000 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0144}{2,5 \cdot \pi}} = 85,7 \text{ mm}$$

Odabrana čelična bešavna cijev DN100 [13].

Unutarnji promjer:

$$d_{u,pr,w} = 107,1 \text{ mm}$$

Unutarnji promjer:

$$d_{v,pr,w} = 114,3 \text{ mm}$$

Debljina stijenke:

$$s_{pr,w} = 3,6 \text{ mm}$$

Stvarna brzina strujanja pare za odabrani priključak

$$w_{pr,w} = \frac{4 \cdot q_{v,w}}{d_{u,pr,w} \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 0,0144}{0,1071^2 \cdot \pi} = 1,6 \text{ m/s}$$

Na priključak se zavaruje odgovarajuća prirubnica s grlom za zavarivanje DN100 [17].

4.3.4. Dimenzioniranje priključka sigurnosnog ventila

Proračun sigurnosnog ventila prema [16].

Radni medij:

Propan

Temperatura:

$$\vartheta_k = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Maseni protok pare:

$$q_{m,para} = 0,9788 \text{ kg/s}$$

Specifični volumen pare:

$$v = 0,0331 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Protutlak:

$$p_b = 1 \text{ bar}$$

Izentropski eksponent [1]

$$c_p'' = 2279,7 \text{ J/kgK}$$

$$R = 188,56 \text{ J/kgK}$$

$$\kappa = \frac{c_p''}{c_p'' - R}$$

$$\kappa = \frac{2279,7}{2279,7 - 188,56}$$

$$\kappa = 1,09$$

Tlak otvaranja:

$$p_o = (1.1 \cdot PS) + 1$$

$$p_o = (1.1 \cdot 13,7) + 1$$

$$p_o = 16,1 \text{ bar}$$

Područje strujanje

$$\frac{p_b}{p_o} < \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$$

$$\frac{1}{16,1} < \left(\frac{2}{1,09 + 1} \right)^{\frac{1,09}{1,09 - 1}}$$

$$0,0621 < 0,587$$

Unutar ventila sigurnosti javlja se natkritično (prigušeno) strujanje pare propana.

Minimalna potrebna površina presjeka

$$A_{SV,min} = \frac{q_m}{K_{dr} \cdot \sqrt{\kappa \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}} \cdot \frac{p_o}{v}}}$$

$$A_{SV,min} = \frac{0,9788}{0,85 \cdot \sqrt{1,09 \cdot \left(\frac{2}{1,109 + 1} \right)^{\frac{1,09 + 1}{1,09 - 1}} \cdot \frac{16,1 \cdot 10^5}{0,0331}}}$$

$$A_{SV,min} = 263,6 \text{ mm}^2$$

Minimalni potrebni promjer

$$d_{SV,min} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{SV,min}}{\pi}}$$

$$d_{SV,min} = \sqrt{\frac{4 \cdot 263,6}{\pi}}$$

$$d_{SV,min} = 18,3 \text{ mm}$$

Odabrani ventil sigurnosti je Alfa Laval DN25 [18].

$$d_{SV} = 23 \text{ mm}$$

4.4. Proračun čvrstoće

4.4.1. Ulazni podatci

Proračunski tlak

$$p_k = 13,7 \text{ bar}$$

Proračunska temperatura

$$\vartheta_k = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Faktor sigurnosti za radno stanje [19]

$$S = 1,5$$

Faktor sigurnosti za ispitno stanje [19]

$$S' = 1,05$$

4.4.2. Odabrani materijal

Odabrani materijal za proračun čvrstoće je PH 355 NH [13]

Granica razvlačenja pri $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$

$$R_{p0,2/20^{\circ}\text{C}} = 355 \text{ N/mm}^2$$

Granica razvlačenja pri $\vartheta = 100^{\circ}\text{C}$

$$R_{p0,2/100^{\circ}\text{C}} = 290 \text{ N/mm}^2$$

Granica razvlačenja pri $\vartheta = 40^{\circ}\text{C}$

$$R_{p0,2/40^{\circ}\text{C}} = R_{p0,2/20^{\circ}\text{C}} - \frac{R_{p0,2/20^{\circ}\text{C}} - R_{p0,2/100^{\circ}\text{C}}}{100 - 20} \cdot (40 - 20) = 338,75 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{p0,2/40^{\circ}\text{C}} = 355 - \frac{355 - 290}{100 - 20} \cdot (40 - 20) = 338,75 \text{ N/mm}^2$$

Vlačna čvrstoća pri $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$

$$R_{m/20^{\circ}\text{C}} = 580 \text{ N/mm}^2$$

Proračunska čvrstoća za radno stanje

$$f_d = \min\left(\frac{R_{p0,2/40^\circ\text{C}}}{1,5}; \frac{R_{m/20^\circ\text{C}}}{2,4}\right) = \min\left(\frac{338,75}{1,5}; \frac{580}{2,4}\right) = \min(225,8; 241,7) =$$

$$f_d = 225,8 \text{ N/mm}^2$$

Proračunska čvrstoća za okolišno stanje

$$f_a = \min\left(\frac{R_{p0,2/20^\circ\text{C}}}{1,5}; \frac{R_{m/20^\circ\text{C}}}{2,4}\right) = \min\left(\frac{355}{1,5}; \frac{580}{2,4}\right) = \min(236,7; 241,7) =$$

$$f_a = 236,7 \text{ N/mm}^2$$

Ispitni tlak

$$PT = \max\left(1,25 \cdot P_d \cdot \frac{f_a}{f_d}; 1,43 \cdot PS\right) = \max\left(1,25 \cdot 13,7 \cdot \frac{236,7}{241,7}; 1,43 \cdot 13,7\right) =$$

$$PT = \max(17,95; 19,59) = 19,59 \text{ bar}$$

Proračunska čvrstoća za ispitni tlak

$$f_{TEST} = \frac{R_{p0,2/20^\circ\text{C}}}{1,05}$$

$$f_{TEST} = \frac{355}{1,05}$$

$$f_{TEST} = 338 \text{ N/mm}^2$$

4.4.3. Proračun cilindričnog plašta izloženog djelovanju unutrašnjeg tlaka prema normi M.E2.253.

4.4.3.1. Ulazni podatci

Plašt je izveden iz čeličnog lima PH 355 N [13].

Odabrane dimenzije plašta

Unutarnji promjer plašta

$$D_v = 700 \text{ mm}$$

Unutarnji promjer plašta

$$D_u = 688 \text{ mm}$$

Debljina stijenke plašta

$$s_e = 6 \text{ mm}$$

Uvjet primjene norme:

$$\frac{D_v}{D_u} = \frac{700}{684} = 1,023 < 1,2$$

Uvjet primjene norme je zadovoljen.

Dodatak za dopušteno odstupanje lima za debele limove prema DIN 1542 [20]

$$c_1 = 0,4 \text{ mm}$$

Dodatak za smanjenje debljine zbog uzrokovano korozijom i trošenjem [20]

$$c_2 = 1 \text{ mm}$$

Koeficijent valjanosti zavarenoga spoja [20]

$$\nu = 0,85$$

4.4.3.2. Potrebna debljina stijenke

Potrebna debljina stijenke za radno stanje

$$s_1 = \frac{D_v \cdot p}{20 \cdot f_d \cdot \nu + p} + c_1 + c_2 = \frac{700 \cdot 13,7}{20 \cdot 225,83 \cdot 0,85 + 13,7} + 0,4 + 1 = 3,89 \text{ mm}$$

Potrebna debljina stijenke za ispitno stanje

$$s_2 = \frac{D_v \cdot PT}{20 \cdot f_{TEST} \cdot \nu + PT} + c_1 + c_2 = \frac{700 \cdot 19,59}{20 \cdot 338,1 \cdot 1 + 19,59} + 0,4 + 1 = 3,06 \text{ mm}$$

Odabrana stijenka $s_e = 6 \text{ mm}$ je veća od potrebnih debljina stijenki te može izdržati zadano opterećenje.

4.4.4. Proračun izreza u plaštu izloženog djelovanju unutrašnjeg tlaka prema normi M.E2.256.

4.4.4.1. Ulazni podatci

Vanjski promjer plašta

$$D_v = 700 \text{ mm}$$

Unutarnji promjer plašta

$$D_u = 688 \text{ mm}$$

Debljina stijenke plašta

$$s_e = s_A = 6 \text{ mm}$$

Dodatak za dopušteno odstupanje lima za srednje debele limove prema DIN 1542 [20]

$$c_1 = 0,4 \text{ mm}$$

Dodatak za smanjenje debljine zbog uzrokovano korozijom i trošenjem [20]

$$c_2 = 1 \text{ mm}$$

Uvjet primjene norme

$$0,002 < \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_v} < 0,1$$

$$0,002 < \frac{6 - 0,4 - 1}{700} < 0,1$$

$$0,002 < 0,00657 < 0,1$$

Uvjet primjene norme je zadovoljen.

Najkritičniji izrez na oba plašta će biti onaj najveći, a taj je priključak za ulaz pare radne tvari, sa sljedećim dimenzijama [13]

Unutarnji promjer priključka ulaza pare RT

$$d_{u,pr,para} = d_u = 207,9 \text{ mm}$$

Unutarnji promjer priključka ulaza pare RT

$$d_{v,pr,para} = 219,1 \text{ mm}$$

Debljina stijenke priključka ulaza pare RT

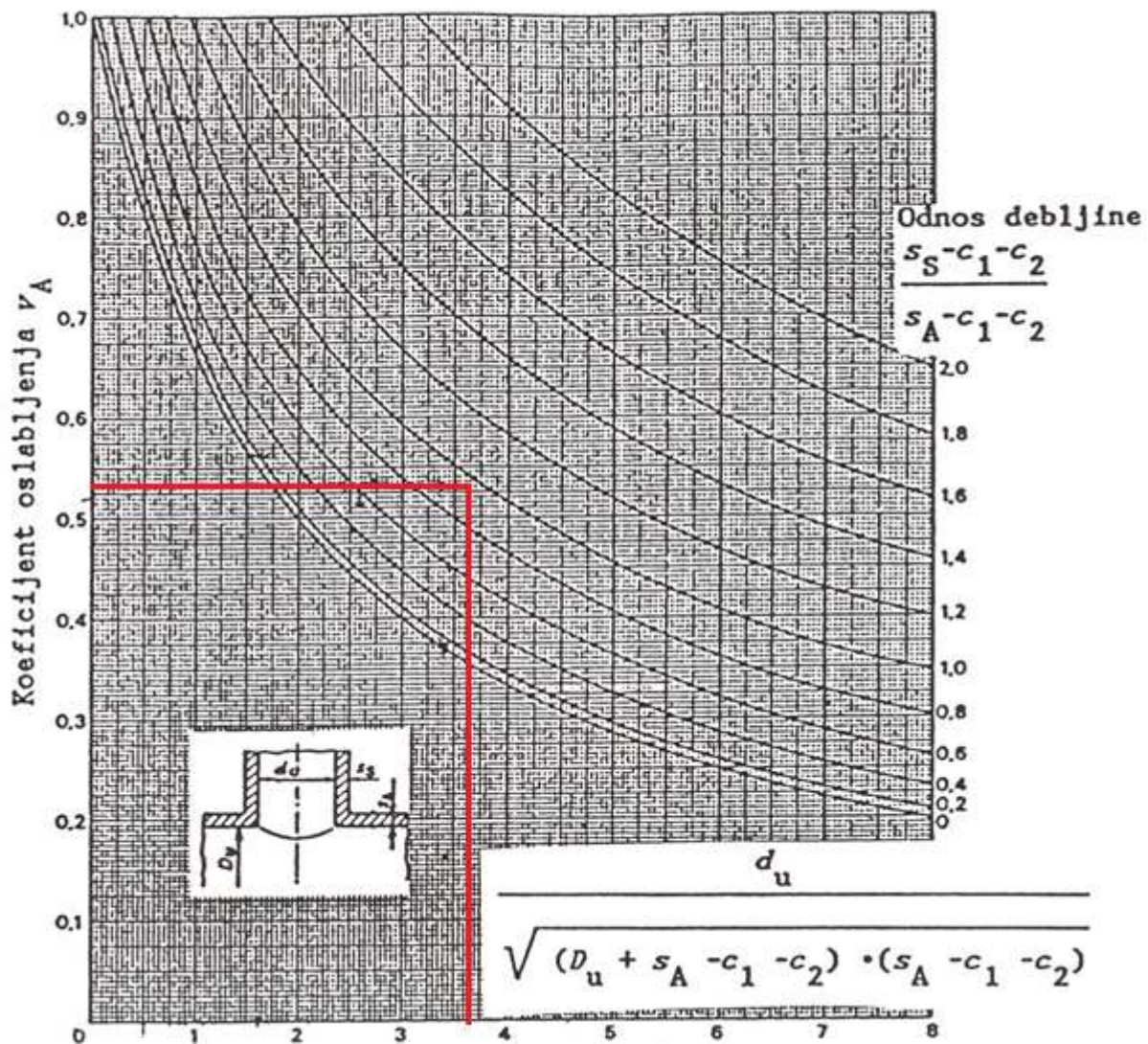
$$s_{pr,para} = s_s = 5,6 \text{ mm}$$

Koeficijent oslabljenja izrezima [21]

$$v_A = f \left(\frac{s_s - c_1 - c_2}{s_A - c_1 - c_2}; \frac{d_u}{\sqrt{(D_u + s_A - c_1 - c_2) \cdot (s_A - c_1 - c_2)}} \right)$$

$$v_A = f\left(\frac{5,6 - 0,4 - 1}{6 - 0,4 - 1}; \frac{207,9}{\sqrt{(688 + 6 - 0,4 - 1) \cdot (8 - 0,72 - 1)}}\right)$$

$$v_A = f(0,91; 3,68)$$



Slika 28. Koeficijent oslabljenja v_A za izreze u cilindrima [21]

$v_A = 0,53$ -Vrijednost je očitana iz dijagrama.

4.4.4.2. Potrebna debljina stijenke

Potrebna debljina stijenke za radno stanje

$$s_1 = \frac{D_v \cdot p}{20 \cdot f_d \cdot v_A + p} + c_1 + c_2 = \frac{700 \cdot 13,7}{20 \cdot 225,83 \cdot 0,53 + 13,7} + 0,4 + 1 = 5,38 \text{ mm}$$

Potrebna debljina stijenke za ispitno stanje

$$s_2 = \frac{D_v \cdot PT}{20 \cdot f_{TEST} \cdot v_A + PT} + c_1 + c_2 = \frac{700 \cdot 19,59}{20 \cdot 338,1 \cdot 0,53 + 19,59} + 0,4 + 1 =$$

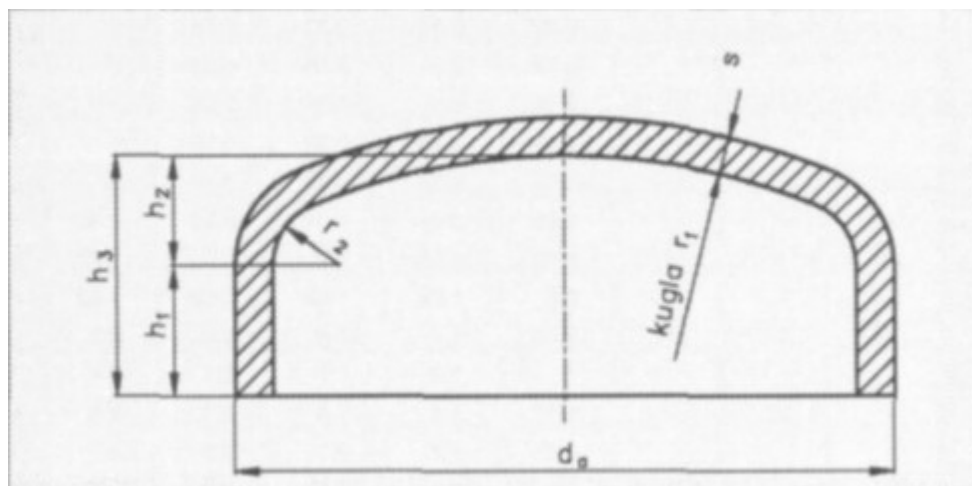
$$s_2 = 5,2 \text{ mm}$$

Odabrana stijenka $s_e = 6 \text{ mm}$ je veća od potrebnih debljina stijenki te može izdržati zadano opterećenje.

4.4.5. Proračun podnice bez izreza izvrgnute unutrašnjem tlaku prema normi M.E2.252.

4.4.5.1. Ulazni podatci

Podnica je izrađena od materijala P 355 NH.



Slika 29. Izvedba plitke podnice [22]

Konstruktivske dimenzije podnice [22]

Vanjski promjer plašta

$$d_a = D_s = 700 \text{ mm}$$

Unutarnji promjer plašta

$$D_u = 688 \text{ mm}$$

Debljina stijenke plašta

$$s = s_e = 6 \text{ mm}$$

Radijus kugle

$$r_1 = d_a = 6 \text{ mm}$$

Radijus unutrašnjeg torusnog dijela

$$r_2 = 0,1 \cdot d_a = 0,1 \cdot 700 = 70 \text{ mm}$$

Konstruktivska veličina h_1

$$h_1 \geq 3s$$

$$h_1 \geq 3 \cdot 6$$

$$h_1 \geq 18 \text{ mm}$$

$$h_1 = 30 \text{ mm (Odabrano)}$$

Konstruktivska veličina h_2

$$h_2 = 0,1935 \cdot d_a - 0,455 \cdot s$$

$$h_2 = 0,1935 \cdot 700 - 0,455 \cdot 6$$

$$h_2 = 132,7 \text{ mm}$$

Promjer kalote podnice

$$D_{kal} = 2 \cdot (r_1 + s_e) = 2 \cdot (700 + 6) = 1412 \text{ mm}$$

$$D_{kal} = 2 \cdot (700 + 6)$$

$$D_{kal} = 1412 \text{ mm}$$

Dodatak za dopušteno odstupanje materijala [20]

$$c_1 = 0,4 \text{ mm}$$

Dodatak za smanjenje debljine zbog uzrokovano korozijom i trošenjem [20]

$$c_2 = 1 \text{ mm}$$

Koeficijent valjanosti zavarenoga spoja [23]

$$\nu = 1 \text{ (Podnica je jednodijelna)}$$

Uvjet primjene norme

$$0,001 < \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} < 0,1$$

$$0,001 < \frac{6 - 0,4 - 1}{700} < 0,1$$

$$0,001 < 0,0065 < 0,1$$

Uvjet primjene norme je zadovoljen.

4.4.5.2. Potrebna debljina stijenke kalotnog dijela podnice

Potrebna debljina stijenke kalotnog dijela podnice za radno stanje

$$s_{K,1} = \frac{D_{kalote} \cdot p}{40 \cdot f_d \cdot v + p} + c_1 + c_2 = \frac{1412 \cdot 13,7}{40 \cdot 225,83 \cdot 1 + 13,7} + 0,4 + 1 = 3,53 \text{ mm}$$

Potrebna debljina stijenke kalotnog dijela podnice za ispitno stanje

$$s_{K,2} = \frac{D_{kalot} \cdot PT}{40 \cdot f_{TEST} \cdot v + PT} + c_1 + c_2 = \frac{142 \cdot 19,59}{40 \cdot 338,1 \cdot 1 + 19,59} + 0,4 + 1 = 3,44 \text{ mm}$$

Odabrana stijenka $s_e = 6 \text{ mm}$ je veća od potrebnih debljina stijenki te može izdržati zadano opterećenje.

4.4.5.3. Potrebna debljina stijenke torusnog dijela podnice

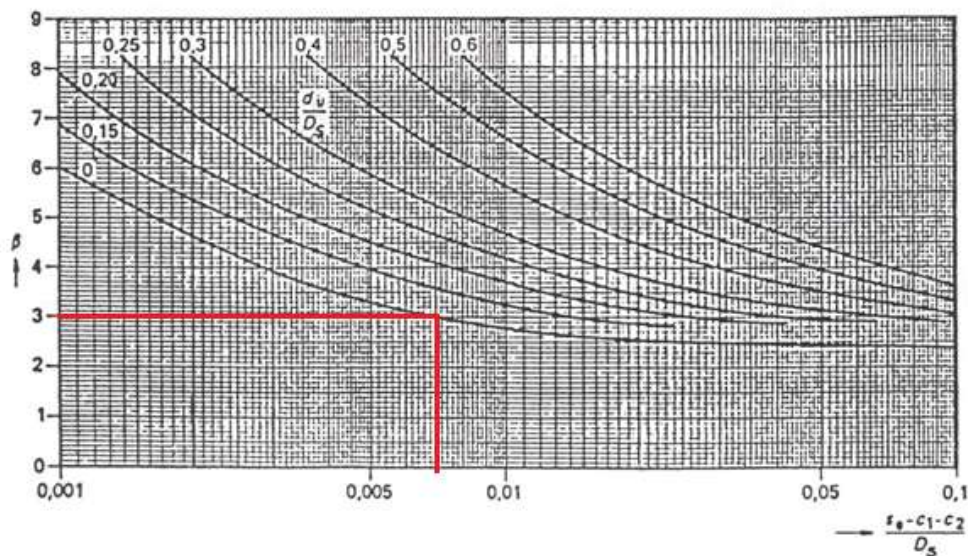
Koeficijent oblika podnice

$d_u = 0 \text{ mm}$ (Podnica nema izreza)

$$\beta = f\left(\frac{d_u}{D_s}; \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s}\right)$$

$$\beta = f\left(\frac{0}{700}; \frac{6 - 0,4 - 1}{700}\right)$$

$$\beta = f(0; 0,007),$$



Slika 30. Koeficijent oslabljenja β za podnicu bez izreza [23]

$\beta = 3$ (očitano iz dijagrama)

Potrebna debljina stijenke torusnog dijela podnice za radno stanje

$$s_{T,1} = \frac{D_s \cdot p \cdot \beta}{40 \cdot f_d \cdot v} + c_1 + c_2 = \frac{700 \cdot 13,7 \cdot 3}{40 \cdot 225,83 \cdot 1} + 0,4 + 1 = 4,58 \text{ mm}$$

Potrebna debljina stijenke torusnog dijela podnice za ispitno stanje

$$s_{T,2} = \frac{D_s \cdot PT \cdot \beta}{40 \cdot f_{TEST} \cdot v} + c_1 + c_2 = \frac{700 \cdot 19,59 \cdot 3}{40 \cdot 338,1 \cdot 1} + 0,4 + 1 = 4,44 \text{ mm}$$

Odabrana stijenka $s_e = 6 \text{ mm}$ je veća od potrebnih debljina stijenki te može izdržati zadano opterećenje.

4.4.5.4. Provjera na elastično ulubljivanje

Veličina koja se nalazi na osi apscisa

$$x = \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} = \frac{6 - 0,4 - 1}{700} = 0,0066$$

Proračunska temperatura

$$T = T_d = 40 + 273,15 = 313,15 \text{ K}$$

Koeficijenti potrebni za izračunavanje modula elastičnosti za feritne čelike

$$b_{21} = 213,29 \text{ kN/mm}^2 \text{ K}$$

$$b_{22} = -0,638 \cdot 10^{-1} \text{ kN/mm}^2 \text{ K}$$

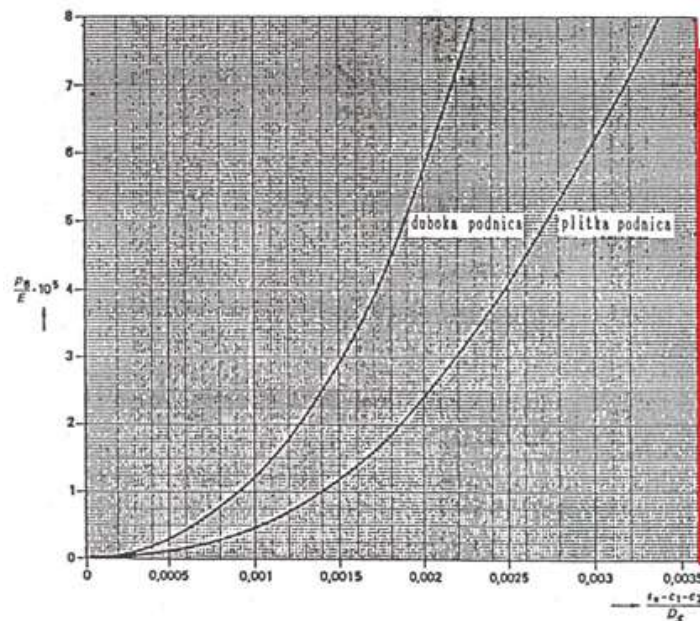
$$b_{23} = -0,3 \cdot 10^{-4} \text{ kN/mm}^2 \text{K}$$

Modul elastičnosti za proračunsku temperaturu

$$E = b_{21} + b_{22} \cdot T + b_{23} \cdot T^2$$

$$E = 213,29 - 0,638 \cdot 10^{-1} \cdot 313,15 - 0,3 \cdot 10^{-4} \cdot 313,15^2 =$$

$$E = 196252 \text{ N/mm}^2$$



Slika 31. Dijagram za određivanje tlaka ulubljivanja [23]

Formula za ekstrapolaciju

$$\frac{p_B}{E} \cdot 10^5 = 4800 \cdot x - 8,2$$

Tlak ulubljivanja

$$p_B = \frac{E}{10^5} \cdot (4800 \cdot x - 8,2) = \frac{196252}{10^5} \cdot (4800 \cdot 0,0066 - 8,2) = 46,01 \text{ bar}$$

Uvjet za tlak ulubljivanja

$$p_B \geq 1,5 \cdot PT = 1,5 \cdot 19,59 = 29,38 \text{ bar}$$

$$46,01 \geq 29,38$$

Uvjet je zadovoljen.

4.4.6. **Proračun podnice s izrezima izvrnute djelovanju unutrašnjeg tlaka prema normi M.E2.256.**

Podnica s izrezima jednakog je materijala izrade (PH 355 NH) i izvedbe (plitka podnica, te će imati jednake veličine kao i podnica bez izreza u poglavlju 4.4.5.1. (unutrašnji radijus r, radijus kalote R, te konstrukcijske dimenzije h_1 i h_2).

$$0,001 < \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_s} < 0,1$$

$$0,001 < \frac{6 - 0,4 - 1}{700} < 0,1$$

$$0,001 < 0,0065 < 0,1$$

Uvjet primjene norme je zadovoljen.

4.4.6.1. *Ulazni podatci*

Na podnici se nalaze izrezi za priključak sigurnosnog ventila i priključak za odvod nekondenzirajućih plinova. Priključci su jednakih dimenzija te će se potrebna debljina stijenke u daljnjem nastavku računati pomoći priključka sigurnosnog ventila sljedećih dimenzija [13]

Unutarnji promjer priključka

$$d_{pr,sv} = 23 \text{ mm}$$

Debljina stijenke priključka

$$s_{pr,sv} = 2,3 \text{ mm}$$

Vanjski promjer kalote

$$D_{ka,v} = 2 \cdot (R + s_e) = 2 \cdot (700 + 6) = 1412 \text{ mm}$$

Unutarnji promjer kalote

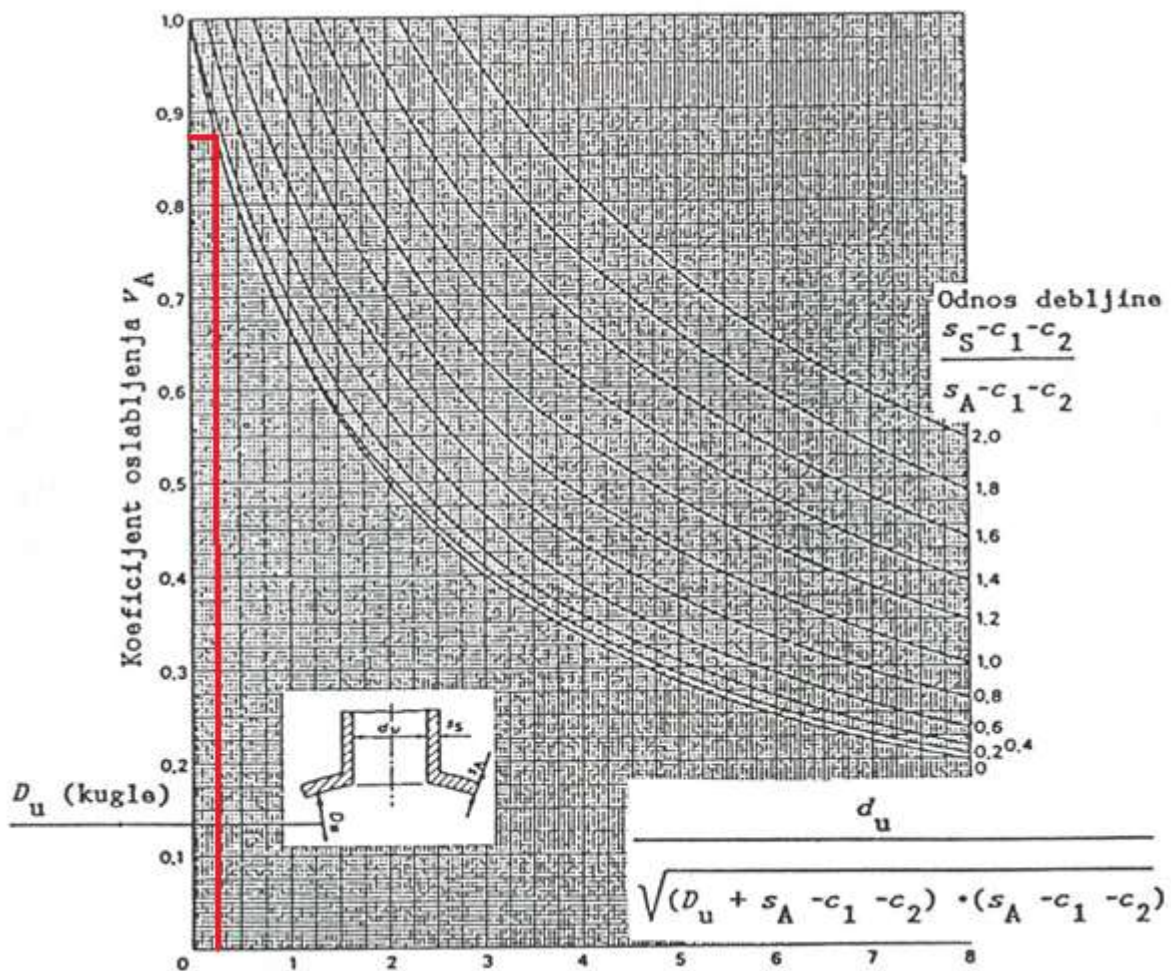
$$D_{kal,u} = 2 \cdot R = 2 \cdot 700 = 1400 \text{ mm}$$

Koeficijent oslabljenja izrezima [21]

$$v_A = f \left(\frac{d_{pr,sv}}{\sqrt{(D_{kalote,u} + s_A - c_1 - c_2) \cdot (s_A - c_1 - c_2)}}; \frac{s_{pr,sv} - c_1 - c_2}{s_A - c_1 - c_2} \right)$$

$$v_A = f\left(\frac{23}{\sqrt{(1400 + 6 - 0,4 - 1) \cdot (6 - 0,4 - 1)}}; \frac{2,3 - 0,4 - 1}{6 - 0,4 - 1}\right)$$

$$v_A = f(0,28; 0,2)$$



Slika 32., Koeficijent oslabljenja v_A za izreze u kuglama [21]

$$v_A = 0,875 \text{ (očitano iz dijagrama)}$$

4.4.6.2. Potrebna debljina stijenke

Potrebna debljina stijenke kalotnog dijela podnice za radno stanje

$$s_{K,1} = \frac{D_{kalote} \cdot p}{40 \cdot f_d \cdot v + p} + c_1 + c_2 = \frac{1412 \cdot 13,7}{40 \cdot 225,83 \cdot 0,875 + 13,7} + 0,4 + 1 = 3,84 \text{ mm}$$

Potrebna debljina stijenke kalotnog dijela podnice za ispitno stanje

$$s_{K,2} = \frac{D_{kalote} \cdot PT}{40 \cdot f_{TEST} \cdot v + PT} + c_1 + c_2 = \frac{1412 \cdot 19,59}{40 \cdot 338,1 \cdot 0,875 + 19,59} + 0,4 + 1 = 3,73 \text{ mm}$$

4.4.7. Proračun vijaka prema normi M.E2.257.

4.4.7.1. Odabir vijaka [13]

Materijal vijka

Klasa 6.6.

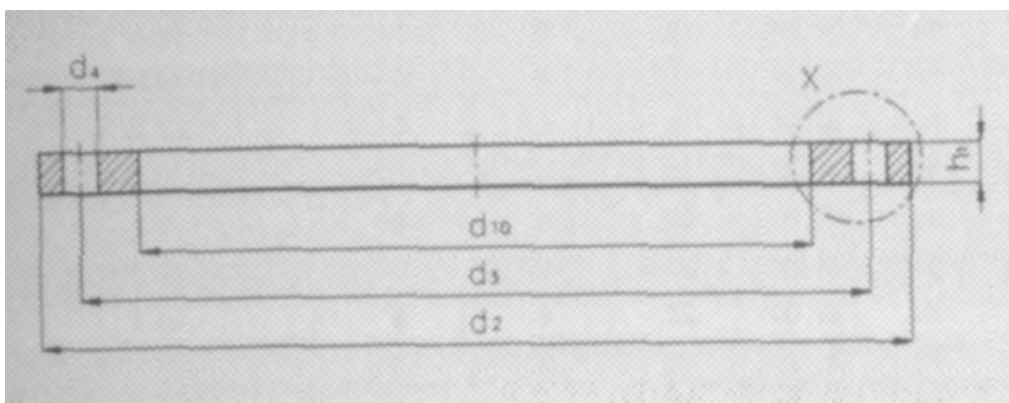
Vlačna čvrstoća pri $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$

$$R_{m/20^{\circ}\text{C}} = 600 \text{ N/mm}^2$$

Granica razvlačenja pri $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$

$$R_{p0,2/20^{\circ}\text{C}} = 360 \text{ N/mm}^2$$

4.4.7.2. Odabir prirubnice



Slika 33. Ravna prirubnica [22]

Geometrijske karakteristike prirubnice odabrane iz [22]

Vanjski promjer prirubnice

$$d_2 = d_s = 830 \text{ mm}$$

Unutarnji promjer prirubnice

$$d_u = d_{10} = 700 \text{ mm}$$

Promjer kruga rupa

$$d_t = d_3 = 780 \text{ mm}$$

Promjer rupa za vijke

$$d_4 = 30 \text{ mm}$$

Broj vijaka

$$N_{vij} = 12$$

4.4.7.3. Odabir brtve

Materijal brtve

klingerit

Vanjski promjer brtve

$$d_{B,v} = 772 \text{ mm}$$

Vanjski promjer brtve

$$d_{B,u} = 708 \text{ mm}$$

Širina brtve

$$s = 3 \text{ mm}$$

Korisna širina brtve

$$b_D = 32 \text{ mm}$$

Srednji promjer brtve

$$d_D = 740 \text{ mm}$$

4.4.7.4. Proračun sile u vijcima

Proračun sile u vijcima proveden je za kružni vijčani spoj s brtvom unutar kruga rupa [24]

1. RADNO STANJE

Sila uslijed djelovanja na gornju površinu

$$F_{RB,1} = \frac{p \cdot \pi \cdot d_u^2}{40} = \frac{13,7 \cdot \pi \cdot 700^2}{40} = 527\,237,79 \text{ N}$$

Sila koja djeluje na prsten koji nije pokriven brtvom

$$F_{FB,1} = \frac{p \cdot \pi \cdot (d_D^2 - d_u^2)}{40} = \frac{13,7 \cdot \pi \cdot (740^2 - 700^2)}{40} = 61\,977,34 \text{ N}$$

Sila u brtvi

Faktor sigurnosti za silu u brtvi [24]

$$S_D = 1,2$$

Koeficijent brtve za radno stanje [24]

$$k_1 = b_D = 32 \text{ mm}$$

$$F_{DB,1} = \frac{p}{10} \cdot \pi \cdot d_D \cdot S_D \cdot k_1 = \frac{13,7}{10} \cdot \pi \cdot 740 \cdot 1,2 \cdot 32 = 122\,301,95 \text{ N}$$

Najmanja sila u vijcima za radno stanje

$$F_{SB,1} = F_{RB,1} + F_{FB,1} + F_{DB,1} = 527\,237,79 + 61\,977,34 + 122\,301,95$$

$$F_{SB,1} = 711\,517,08 \text{ N}$$

2. ISPITNO STANJE

Sila uslijed djelovanja na gornju površinu

$$F_{RB,2} = \frac{PT \cdot \pi \cdot d_u^2}{40} = \frac{19,59 \cdot \pi \cdot 700^2}{40} = 753\,950,04 \text{ N}$$

Sila koja djeluje na prsten koji nije pokriven brtvom

$$F_{FB,2} = \frac{PT \cdot \pi \cdot (d_D^2 - d_u^2)}{40} = \frac{19,59 \cdot \pi \cdot (740^2 - 700^2)}{40} = 88\,627,60 \text{ N}$$

Sila u brtvi

$$F_{DB,2} = \frac{PT}{10} \cdot \pi \cdot d_D \cdot S_D \cdot k_1 = \frac{19,59}{10} \cdot \pi \cdot 740 \cdot 1,2 \cdot 32 = 174\,891,79 \text{ N}$$

Najmanja sila u vijcima za ispitno stanje

$$F_{SB,2} = F_{RB,2} + F_{FB,2} + F_{DB,2} = 753\,950,04 + 88\,627,60 + 174\,891,79 =$$

$$F_{SB,2} = 1\,017\,469,42 \text{ N}$$

3. UGRADBENO STANJE

Svojstvo brtve [24]

$$k_o \cdot K_D = 15 \cdot b_D = 15 \cdot 32 = 480 \text{ N/mm}$$

Najmanja sila u vijcima za ugradbeno stanje

$$F_{DV,3} = \pi \cdot d_D \cdot k_o \cdot K_D = \pi \cdot 780 \cdot 480 = 1\,176\,212,29 \text{ N}$$

Sila $F_{DV,3} = 1\,176\,212,29 \text{ N} > F_{SB,1} = 711\,517,08 \text{ N}$ pa se može zamijeniti:

$$F_{DV} = 0,2 \cdot F_{DV,3} + 0,8 \cdot \sqrt{F_{SB,1} \cdot F_{DV,3}}$$

$$F_{DV} = 0,2 \cdot 1\,176\,212,29 + 0,8 \cdot \sqrt{711\,517,08 \cdot 1\,176\,212,29}$$

$$F_{DV} = 967\,098,24\,N$$

4.4.7.5. Proračun promjera vijaka

Pomoćna vrijednost φ [24]

$\varphi = 1$ (obrađena površina)

Pomoćna vrijednost Z [24]

$Z = 1,51$ -radno stanje

$Z' = 1,51$ -ugradbeno i ispitno stanje

1.RADNO STANJE

Konstruktivski dodatak c_5 [24]

$$Z \cdot \sqrt{\frac{F_{SB,1}}{K \cdot N_{vij}}} = 1,51 \cdot \sqrt{\frac{711\,517,08}{360 \cdot 12}} = 12,83\,mm < 20\,mm$$

$$c_5 = 3\,mm$$

Promjer jezgre vijka

$$d_{vij,1} = Z \cdot \sqrt{\frac{F_{SB}}{K \cdot N_{vij}}} + c_5 = 1,51 \cdot \sqrt{\frac{711\,517,08}{360 \cdot 12}} + 3 = 22,38\,mm$$

2.ISPITNO STANJE

$$d_{vij,2} = Z' \cdot \sqrt{\frac{F_{SB,2}}{K \cdot N_{vij}}} = 1,29 \cdot \sqrt{\frac{1017496,42}{360 \cdot 12}} = 19,3\,mm$$

3.UGRADBENO STANJE

$$d_{vij,3} = Z' \cdot \sqrt{\frac{F_{DV}}{K \cdot N_{vij}}} = 1,29 \cdot \sqrt{\frac{967098,24}{360 \cdot 12}} = 19,8\,mm$$

Odabrani vijci M30 [13].

4.4.8. Proračun ravne prirubnice prema normi M.E2.258.

Vanjski promjer prirubnice

$$d_2 = d_s = 830 \text{ mm}$$

Unutarnji promjer prirubnice

$$d_u = d_{10} = 700 \text{ mm}$$

Promjer kruga rupa

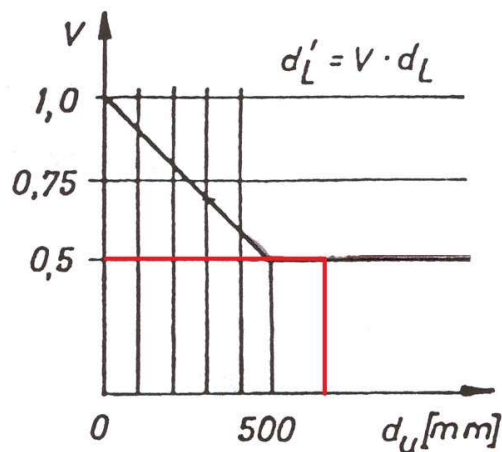
$$d_t = d_3 = 780 \text{ mm}$$

Promjer rupa za vijke

$$d_4 = 30 \text{ mm}$$

Broj vijaka

$$N_{vij} = 12$$



Slika 34. Faktor v za izračun umanjenog provrta za vijke [25]

$v = 0,5$ (očitano iz dijagrama)

Umanjeni promjer rupa za vijke

$$d'_L = v \cdot d_l = 0,5 \cdot 30 = 15 \text{ mm}$$

Korisna dvostruka širina prirubnice

$$b = d_s - d_u - 2 \cdot d'_L = 830 - 700 - 2 \cdot 15 = 112 \text{ mm}$$

Pomoćna vrijednost Z

$$Z = (d_u + s_1) \cdot s_1^2 = (700 + 6) \cdot 6^2 = 24984 \text{ mm}^3$$

Krak djelovanja sile u vijku za radno i ispitno stanje

$$a = \frac{d_s - d_u - s_1}{2}$$

$$a = \frac{830 - 700 - 6}{2}$$

$$a = 68 \text{ mm}$$

Krak djelovanja sile za ugradbeno stanje

$$a_D = \frac{d_s - d_D}{2} = \frac{830 - 740}{2} = 45 \text{ mm}$$

PRORAČUN MOMENTA OTPORA

Moment otpora za radno stanje

$$W_1 = \frac{F_{SB,1}}{f_d} \cdot a = \frac{711517,08}{225,83} \cdot 68 = 214242,78 \text{ mm}^3$$

Moment otpora za ispitno stanje

$$W_2 = \frac{F_{SB,2}}{f_{TEST}} \cdot a = \frac{1017496,42}{338,1} \cdot 68 = 128719,41 \text{ mm}^3$$

Moment otpora za stanje ugradnje

$$W_3 = \frac{F_{DV}}{f_{TEST}} \cdot a_D = \frac{967098,24}{338,1} \cdot 45 = 204640,33 \text{ mm}^3$$

Maksimalni moment otpora

$$W_{max} = \max(W_1; W_2; W_3) = \max(214242,78; 128719,41; 204640,33) = 214242,78 \text{ mm}^3$$

$$W_{max} = 214242,78 \text{ mm}^3$$

Potrebna visina oboda prirubnice

$$h_F = \sqrt{1,42 \cdot \frac{W - Z}{b}} = \sqrt{1,42 \cdot \frac{214242,78 - 24984}{112}} = 49,93 \text{ mm}$$

Za debljinu stijenke prirubnice odabrano $h_F = 60 \text{ mm}$.

4.4.9. Proračun cijevne stijenke prema normi M.E2.259.

4.4.9.1. Ulazni podatci

Unutarnji promjer plašta

$$D_1 = 688 \text{ mm}$$

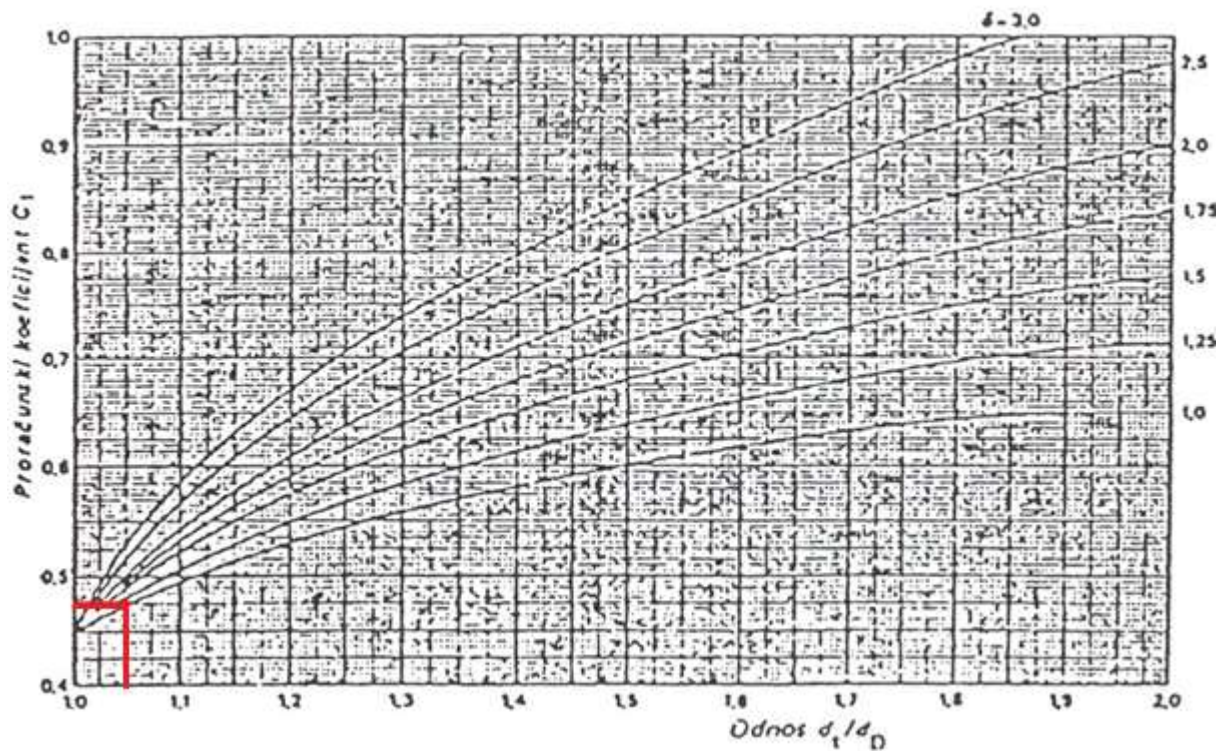
Koeficijent C za neukružene ploče s dodatnim istosmjernim momentom [26]

$$C_1 = \left(\frac{d_t}{d_D}; \delta \right)$$

$$C_1 = \left(\frac{d_t}{d_D}; 1 + 4 \cdot \frac{k_1 \cdot S_D}{d_D} \right)$$

$$C_1 = \left(\frac{780}{740}; 1 + 4 \cdot \frac{32 \cdot 1,2}{740} \right)$$

$$C_1 = (1,05; 1,21)$$



Slika 35. Koeficijent C za ukružene ploče [26]

$$C_1 = 0,475 \text{ (očitano iz dijagrama)}$$

Koeficijenti oslabljenja [26]

$$\frac{d_s}{d_u} = \frac{28}{25} = 1,12 < 1,2$$

pa vrijedi

$$v = \frac{t - d_u}{t} = \frac{36 - 25}{36} = 0,3055$$

4.4.9.2. Potrebna debljina stijenske

Potrebna debljina stijenske za radno stanje

$$s_1 = C_1 \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p}{10 \cdot v \cdot f_d}}$$

$$s_1 = 0,475 \cdot 688 \cdot \sqrt{\frac{13,7}{10 \cdot 0,3055 \cdot 225,83}}$$

$$s_1 = 46,05 \text{ mm}$$

Potrebna debljina stijenke za ispitno stanje

$$s_2 = C_1 \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{PT}{10 \cdot v \cdot f_{TEST}}}$$

$$s_2 = 0,475 \cdot 688 \cdot \sqrt{\frac{19,59}{10 \cdot 0,3055 \cdot 338,1}}$$

$$s_2 = 45,0 \text{ mm}$$

Za debljinu stijenke prirubnice odabrano $s = 60 \text{ mm}$.

4.4.10. Minimalna širina zavora

Korisna površina zavora

$$A_R = h \cdot t - \frac{d_v^2 \cdot \pi}{4}$$

$$A_R = 0,031 \cdot 0,036 - \frac{0,028^2 \cdot \pi}{4}$$

$$A_R = 0,0005 \text{ m}^2$$

Sila koja djeluje na zavar

$$F_R = A_R \cdot p$$

$$F_R = 0,0005 \cdot 13,7 \cdot 10^5$$

$$F_R = 685 \text{ N}$$

Minimalna širina zavora oko cijevi

$$g = 0,4 \cdot \frac{F_R}{d_v \cdot f_d}$$

$$g = 0,4 \cdot \frac{685}{25 \cdot 225,83}$$

$$g = 0,048 \text{ mm}$$

Odabrana širina zavora $g = 2 \text{ mm}$

4.5. Hidraulički proračun

4.5.1. Pad tlaka na strani rashladne vode

Proračun pada tlaka na strani rashladne vode provest će se prema Donohuea-u [14].

4.5.1.1. Pad tlaka u krajnjoj zoni i međuzoni

Broj segmentnih pregrada

$$z_s = 10$$

Broj poprečno nastrojanih redova cijevi u međuzoni

$$z_p = 10$$

Najuži presjek strujanja u međuzoni

$$S_M = 0,042 \text{ m}^2$$

Brzina strujanja vode u krajnjim zonama i međuzoni

$$w_{MKZ} = \frac{q_{v,w}}{S_M} = \frac{0,0144}{0,042} = 0,343 \text{ m/s}$$

Poprečni korak cijevi

$$t = 36 \text{ mm}$$

Normirani poprečni korak cijevi [15]

$$t_p = \frac{t}{d_v} = \frac{36}{28} = 1,286$$

Kritični Reynoldsov broj (prijelaz iz laminarnog u turbulentno strujanje) [15]

$$Re_{kr} = \frac{42,3}{t_p - 1} = \frac{42,3}{1,286 - 1} = 148,05$$

Reynoldsov broj u krajnjim zonama i međuzoni

$$Re_{MKZ} = \frac{\rho_2 \cdot w_M \cdot d_v}{\eta_2} = \frac{995,54 \cdot 0,343 \cdot 0,028}{0,0007889} = 12131,18$$

$$Re_{MKZ} = 12131,18 > Re_{kr} = 148,05$$

Strujanje je turbulentno.

Koeficijent za šahovski smještaj cijevi [15]

$$C_{t,\text{š}} = 3$$

Koeficijent otpora strujanja u krajnjim zonama i međuzoni

$$\xi_t = \frac{C_{t,\text{š}}}{(t_p - 1)^{0,2} \cdot Re_{MKZ}^{0,2}} = \frac{3}{(1,286 - 1)^{0,2} \cdot 12131,18^{0,2}} = 0,588$$

Pad tlaka za krajnje zone i međuzone

$$\Delta p_K + \Delta p_M = \xi_t \cdot z_p \cdot (z_s + 1) \cdot \frac{\rho_2 \cdot w_{MKZ}^2}{2} = 0,588 \cdot 8 \cdot (10 + 1) \cdot \frac{995,54 \cdot 0,343^2}{2}$$

$$\Delta p_K + \Delta p_M = 7080,23 \text{ Pa}$$

4.5.1.2. Pad tlaka u uzdužnoj zoni

Slobodni presjek strujanja u uzdužnoj zoni

$$S_U = 0,0523 \text{ m}^2$$

Koeficijent otpora strujanja u uzdužnoj zoni [15]

$$\xi_U = 2 = \textit{kons.}$$

Brzina strujanja vode u uzdužnoj zoni

$$w_U = \frac{q_{v,w}}{S_U} = \frac{0,0144}{0,0523} = 0,276 \text{ m/s}$$

Pad tlaka u uzdužnoj zoni

$$\Delta p_U = \xi_U \cdot z_s \cdot \frac{\rho_2 \cdot w_U^2}{2} = 2 \cdot 10 \cdot \frac{995,54 \cdot 0,276^2}{2} = 2453,49 \text{ Pa}$$

4.5.1.3. Pad tlaka u priključcima

Priključci za ulaz i izlaz vode su istih dimenzija, te će voda u njima strujati istom brzinom, pa se ukupan pad tlaka može računati zajedno zbrajanjem koeficijenata otpora.

Koeficijent otpora strujanju na ulazu u priključak [15]

$$\xi_{pr,w,ul} = 0,5$$

Koeficijent otpora strujanju na izlazu iz priključka [15]

$$\xi_{pr,w,izl} = 1$$

Brzina vode na ulazu u priključak

$$w_{pr,w} = 1,6 \text{ m/s}$$

Pad tlaka u priključcima

$$\Delta p_{pr,w} = (\xi_{pr,w,ul} + \xi_{pr,w,izl}) \cdot \frac{\rho_2 \cdot w_{pr,w}^2}{2} = 1,5 \cdot \frac{995,54 \cdot 1,6^2}{2} = 1911,44 \text{ Pa}$$

4.5.1.4. Ukupan pad tlaka na strani rashladne vode

Ukupan pad tlaka na strani vode biti će jednak zbroju padova tlaka za strujanje vode u krajnjim zonama, međuzonama, uzdužnoj zoni i onima u priključcima.

$$\Delta p_{uk,w} = \Delta p_K + \Delta p_M + \Delta p_U + \Delta p_{pr,w} = 7080,23 + 2453,49 + 1911,44$$

$$\Delta p_{uk,w} = 11445,16 \text{ Pa}$$

4.5.2. Pad tlaka na strani radne tvari

4.5.2.1. Pad tlaka u cijevima

Pad tlaka u cijevima će se računati prema formulama koje koristi VDI Heat Atlas [8] za kondenzaciju unutar cijevi. Slijed računanja prikazan je u analizi izmjene topline u poglavlju 3.3.3.7. te je posljednji korak zbrajanje smičnih naprezanja između dvije koordinata sadržaja pare te njihovog osrednjavanja koje daje pad tlaka na dijelu koji se nalazi između njih.

Pad tlaka između dvije točke

$$\Delta p_{\Delta x} = \frac{\tau_{D,x} + \tau_{D,x+\Delta x}}{2} \cdot \frac{4 \cdot \Delta L}{d - (\delta_{F,x}^+ + \delta_{F,x+\Delta x}^+)} [Pa]$$

$x[kg/kg]$	$u[m/s]$	$\tau_D[N/m^2]$	$\Delta p[Pa]$
0,01	0,1738	0,5750	166,439
0,10	0,9121	1,1671	172,144
0,20	1,4878	1,3202	158,033
0,30	2,0223	1,4062	147,737
0,40	2,5404	1,4350	137,054
0,50	3,0492	1,4080	124,332
0,60	3,5516	1,3247	108,470
0,70	4,0486	1,1839	94,389
0,80	4,5648	1,1240	77,899
0,90	5,0685	0,9639	37,381
0,99	5,4834	0,5522	$\Delta p = 1223,881 Pa$

Tablica 2. Tablični proračun padova tlaka u cijevima Shell&Tube izmjenjivača

Ukupan pad tlaka u cijevi

$$\Delta p_{cij} = 1223,9 Pa$$

4.5.2.2. Pad tlaka u priključcima

Koeficijent otpora strujanju na ulazu u priključak [15]

$$\xi_{pr,para,ul} = 0,5$$

Brzina pare RT na ulazu u priključak

$$w_{pr,para} = 9,54 m/s$$

Pad tlaka u priključcima

$$\Delta p_{pr,para} = \xi_{pr,para,ul} \cdot \frac{\rho'' \cdot w_{pr,para}^2}{2} = 0,5 \cdot \frac{3,02 \cdot 9,54^2}{2} = 68,73 Pa$$

PAD TLAKA NA PRIKLJUČKU ODVODA KONDENZATA RADNE TVARI

Koeficijent otpora strujanju na ulazu u priključak [15]

$$\xi_{pr,kond,izl} = 1$$

Brzina kondenzata RT na na izlazu priključka

$$w_{pr,kond} = 0,54 \text{ m/s}$$

Pad tlaka u priključcima

$$\Delta p_{pr,kond} = \xi_{pr,kond,izl} \cdot \frac{\rho' \cdot w_{pr,kond}^2}{2} = 0,5 \cdot \frac{467,29 \cdot 0,54^2}{2} = 34 \text{ Pa}$$

4.5.2.3. Pad tlaka na ulazu/izlazu cijevnog snopa

PAD TLAKA PARE RADNE TVARI NA ULAZU U CIJEVNI SNOP

Koeficijent otpora strujanju na ulazu u priključak [15]

$$\xi_{snop,para,ul} = 0,56 \text{ (normalni koeficijent za izvučenu cijev prema Weisbachu)}$$

Brzina pare radne tvari na ulazu u cijevni snop

$$w_{snop,para} = 5,48 \text{ m/s (preuzeto iz tablice s međurezultatima za sadržaj pare } x=0,99) \\ \text{(Tablica 1.)}$$

Pad tlaka u priključcima

$$\Delta p_{snop,para} = \xi_{snop,para,ul} \cdot \frac{\rho'' \cdot w_{snop,para}^2}{2} = 0,56 \cdot \frac{3,02 \cdot 5,48^2}{2} = 25,4 \text{ Pa}$$

PAD TLAKA KONDENZATA RADNE TVARI NA IZLAZU IZ CIJEVNOG SNOPI

Omjer površina strujanja u cijevi i komori [15]

$$\Lambda = \frac{A_u}{A_k} = \frac{\frac{d_u^2 \cdot \pi}{4}}{\frac{d_k^2 \cdot \pi}{4} \cdot 0,5} = \frac{25^2 \cdot \pi}{4}{\frac{688^2 \cdot \pi}{4} \cdot 0,5} = 0,00264$$

Koeficijent otpora strujanju na izlazu iz priključka [15]

$$\xi_{snop,kond,izl} = (1 - \Lambda)^2 = (1 - 0,00264)^2 = 0,995$$

Brzina kondenzata RT na na izlazu priključka (Tablica 1. Tablični proračun koeficijenata prijelaza , prolaza topline i potrebne duljine cijevi.)

$$w_{snop,kond} = \frac{q_{m,kond,x=0,01}}{A_u \cdot \rho_w} = \frac{0,008}{\frac{0,025^2 \cdot \pi}{4} \cdot 467,29} = 0,035 \text{ m/s}$$

Pad tlaka u priključcima

$$\Delta p_{snop,kond} = \xi_{snop,kond,izl} \cdot \frac{\rho' \cdot w_{pr,kond}^2}{2} = 0,995 \cdot \frac{467,29 \cdot 0,035^2}{2} = 0,28 \text{ Pa}$$

4.5.2.4. Ukupan pad tlaka na strani radne tvari

Ukupan pad tlaka na strani radne tvari bit će jednak sumi padova tlaka u cijevima, priključcima i na ulazu/izlazu cijevnog snopa.

$$\Delta p_{uk,RT} = \Delta p_{cij} + \Delta p_{pr,para} + \Delta p_{pr,kond} + \Delta p_{snop,para} + \Delta p_{snop,kond}$$

$$\Delta p_{uk,RT} = 1223,9 + 67,73 + 34 + 25,4 + 0,28 = 1351,31 \text{ Pa}$$

4.5.3. Ukupan pad tlaka na izmjenjivaču

Ukupan pad tlaka na izmjenjivaču biti će jednak sumi padova na tlaka na strani vode i radne tvari.

$$\Delta p_{uk} = \Delta p_{uk,w} + \Delta p_{uk,RT} = 11445,16 + 1351,3 = 12796,5 \text{ Pa}$$

4.6. Određivanje klase posude pod tlakom

4.6.1. Volumen izmjenjivača na strani radne tvari

4.6.1.1. Volumen priključka za dovod pare radne tvari

Unutarnji promjer priključka za dovod pare radne tvari [13]

$$d_{u,pr,para} = 207,9 \text{ mm}$$

Duljina priključka za dovod pare radne tvari

$$L_{pr,para} = 158 \text{ mm}$$

Volumen priključka

$$V_{pr,para} = \frac{d_{u,pr,para}^2 \cdot \pi}{4} \cdot L_{pr,para} = \frac{207,9^2 \cdot \pi}{4} \cdot 158 = 5363594 \text{ mm}^3$$

4.6.1.2. Volumen priključka za odvod kondenzata radne tvari

Unutarnji promjer priključka za dovod pare radne tvari [13]

$$d_{u,pr,kond} = 70,3 \text{ mm}$$

Duljina priključka za dovod pare radne tvari

$$L_{pr,kond} = 135 \text{ mm}$$

Volumen priključka

$$V_{pr,kond} = \frac{d_{u,pr,kond}^2 \cdot \pi}{4} \cdot L_{pr,kond} = \frac{70,3^2 \cdot \pi}{4} \cdot 135 = 524003 \text{ mm}^3$$

4.6.1.3. Volumen lijevog plašta

Unutarnji promjer plašta

$$D_{u,pl} = 688 \text{ mm}$$

Duljina lijevog plašta

$$L_{pl,lijevi} = 490 \text{ mm}$$

Volumen plašta

$$V_{pl,lijevi} = \frac{D_{u,pl}^2 \cdot \pi}{4} \cdot L_{pl,lijevi} = \frac{688^2 \cdot \pi}{4} \cdot 490 = 188574099 \text{ mm}^3$$

4.6.1.4. Volumen podnice

Konstruktivske dimenzije podnice [22]

Unutarnji promjer plašta

$$D_u = 688 \text{ mm}$$

Radijus kugle

$$r_1 = 700 \text{ mm}$$

Konstruktivska veličina h_1

$$h_1 = 30 \text{ mm}$$

Konstruktivska veličina h_2

$$h_2 = 132,7 \text{ mm}$$

Volumen podnice

$$V_{pod} = \left(\frac{D_u^2 \cdot \pi}{4} \cdot h_1 + \frac{\pi \cdot h_2^2}{3} \cdot (3 \cdot R - h_2) \right) =$$

$$V_{pod} = \left(\frac{688^2 \cdot \pi}{4} \cdot 30 + \frac{\pi \cdot 132,7^2}{3} \cdot (3 \cdot 700 - 132,7) \right) =$$

$$V_{pod} = 47430714 \text{ mm}^3$$

4.6.1.5. Volumen cijevi

S obzirom da je izmjenjivač u U-izvedbi te svaki red cijevi ima različitu duljinu, u tablici je priložen broj cijevi u pojedinom redu cijevi s pripadajućim radijusima zakrivljenosti.

Red cijevi	Broj cijevi u redu N	Radijus zakrivljenosti R[mm]
1.	18	57
2.	17	88
3.	16	119
4.	15	150
5.	14	181
6.	13	212
7.	12	243
8.	9	274
9.	6	305

Tablica 3. Radijusi zakrivljenosti cijevi u Shell&Tube izmjenjivaču

Unutarnji promjer cijevi [13]

$$d_u = 25 \text{ mm}$$

Broj cijevi

$$N_{cij} = 120$$

Duljina horizontalnog dijela

$$L_{cij} = 5727 \text{ mm}$$

Volumen cijevi

$$V_{u,cij} = \frac{d_u^2 \cdot \pi}{4} \cdot \left((R_1 \cdot N_1 + R_2 \cdot N_2 + R_3 \cdot N_3 + R_4 \cdot N_4 + R_4 \cdot N_4 + R_4 \cdot N_4 + R_4 \cdot N_4 + R_4 \cdot N_4 + R_4 \cdot N_4) \cdot \pi + N_{cij} \cdot L \right) =$$

$$V_{u,cij} = \frac{25^2 \cdot \pi}{4} \cdot ((18 \cdot 57 + 17 \cdot 88 + 16 \cdot 119 + 15 \cdot 150 + 14 \cdot 181 + 13 \cdot 212 + 12 \cdot 243 + 9 \cdot 274 + 6 \cdot 305) \cdot \pi + 5727 \cdot 120) = 366923032 \text{ mm}^3$$

4.6.1.6. Ukupni volumen na strani radne tvari

Ukupni volumen na strani radne tvari biti će jednak zbroju volumena priključaka, lijevog plašta, podnice i U-cijevi.

$$V_{RT} = V_{pr,para} + V_{pr,kond} + V_{pod} + V_{u,cij} + V_{pl,lijevi} =$$

$$V_{RT} = 5363594 + 524003 + 47430714 + 366923032 + 188574099 =$$

$$V_{RT} = 608815442 \text{ mm}^3 = 609 \text{ l}$$

4.6.2. Volumen aparata na strani rashladne vode

4.6.2.1. Volumen priključka za dovod/odvod vode

Unutarnji promjer priključka za dovod/odvod vode [13]

$$d_{u,pr,w} = 107,1 \text{ mm}$$

Duljina priključka za dovod /odvod vode (očitano s sklopnog crteža)

$$L_{pr,w} = 142 \text{ mm}$$

Volumen priključaka za dovod i odvod vode

$$V_{pr,w} = 2 \cdot \frac{d_{u,pr,w}^2 \cdot \pi}{4} \cdot L_{pr,w} = 2 \cdot \frac{107,1^2 \cdot \pi}{4} \cdot 142 = 2558510 \text{ mm}^3$$

4.6.2.2. Volumen podnice

Podnica na strani rashladne vode jednakih je konstrukcijskih dimenzija kao ona na strani vode.

$$V_{pod} = 47430714 \text{ mm}^3$$

4.6.2.3. Volumen desnog plašta

Unutarnji promjer plašta

$$D_{u,pl} = 688 \text{ mm}$$

Duljina desnog plašta

$$L_{pl,desni} = 3040 \text{ mm}$$

Volumen plašta

$$V_{pl,desni} = \frac{D_{u,pl}^2 \cdot \pi}{4} \cdot L_{pl,desni} = \frac{688 \cdot \pi}{4} \cdot 3040 = 1169929104 \text{ mm}^3$$

4.6.2.4. Volumen cijevi

Duljina cijevi, potrebni radijusi, redovi cijevi i broj cijevi u pojedinom redu jednaki su onima kod izračuna volumena na strani radne tvari (Tablica 3. Radijusi zakrivljenosti cijevi u Shell&Tube izmjenjivaču), međutim potrebno je koristiti veći promjer cijevi jer se potreban volumen na strani vode dobije oduzimanjem volumena cijevi od volumena plašta.

Vanjski promjer cijevi

$$d_v = 25 \text{ mm}$$

Volumen cijevi

$$V_{v,cij} = V_{u,cij} \cdot \frac{d_v^2}{d_v^2}$$

$$V_{v,cij} = 366923032 \cdot \frac{28^2}{25^2}$$

$$V_{v,cij} = 460268251 \text{ mm}^3$$

4.6.2.5. Volumen segmentnih pregrada

Masa segmentnih pregrada

$$m_{sp} = 1,9 \text{ kg}$$

Gustoća čelika

$$\rho_{Fe} = 7850 \text{ kg/m}^3$$

Broj segmentnih pregrada

$$z_s = 10$$

Volumen koji zauzimaju segmentne pregrade

$$V_{sp} = z_s \cdot \frac{m_{sp}}{\rho_{\check{c}}} = 10 \cdot \frac{1,9}{7850} = 2420382 \text{ mm}^3$$

4.6.2.6. Volumen držača razmaka

U tablici su dani potrebni promjeri, duljine te broj držača razmaka potrebni za proračun volumena vode unutar izmjenjivača.

	Količina(n_{dr})	Duljina (L_{dr}) [mm]	Vanjski promjer($d_{v,dr}$) [mm]
Držač razmaka 244 mm	18	244	16
Držač razmaka 298 mm	4	298	16
Držač razmaka 496 mm	16	496	16
Držač razmaka 546 mm	2	546	16

Tablica 4. Tablica s konstrukcijskim veličinama držača razmaka

Volumen koji zauzimaju držači razmaka

$$V_{dr} = n_{dr,1} \cdot \frac{d_{dr,1}^2 \cdot \pi}{4} \cdot L_{dr,1} + n_{dr,2} \cdot \frac{d_{dr,2}^2 \cdot \pi}{4} \cdot L_{dr,2} + n_{dr,3} \cdot \frac{d_{dr,3}^2 \cdot \pi}{4} \cdot L_{dr,3} + n_{dr,4} \cdot \frac{d_{dr,4}^2 \cdot \pi}{4} \cdot L_{dr,4}$$

$$V_{dr} = 18 \cdot \frac{16^2 \cdot \pi}{4} \cdot 244 + 4 \cdot \frac{16^2 \cdot \pi}{4} \cdot 298 + 16 \cdot \frac{16^2 \cdot \pi}{4} \cdot 496 + 2 \cdot \frac{16^2 \cdot \pi}{4} \cdot 546$$

$$V_{dr} = 2937917 \text{ mm}^3$$

4.6.2.7. Ukupan volumen rashladne vode u izmjenjivaču

Ukupan volumen vode u izmjenjivaču bit će jednak zbroju volumena priključaka i plašta, umanjjenih za volumen cijevi, segmentnih pregrada i držača razmaka.

$$V_w = V_{pr,w} + V_p - V_{cij} - V_{sp} - V_{dr}$$

$$V_w = 2558510 + 1169929104 - 460268251 - 2420382 - 2937917$$

$$V_w = 706861064 \text{ mm}^3 = 707 \text{ l}$$

4.6.3. Određivanje kategorije opreme pod tlakom

4.6.3.1. Radna tvar

Prema Pravilniku o tlačnoj opremi [27] propan (R290) spada u kategoriju fluida Grupe 1, što se odnosi na opasne fluide.

Najveći dozvoljeni radni tlak

$$PS = 13,7 \text{ bar}$$

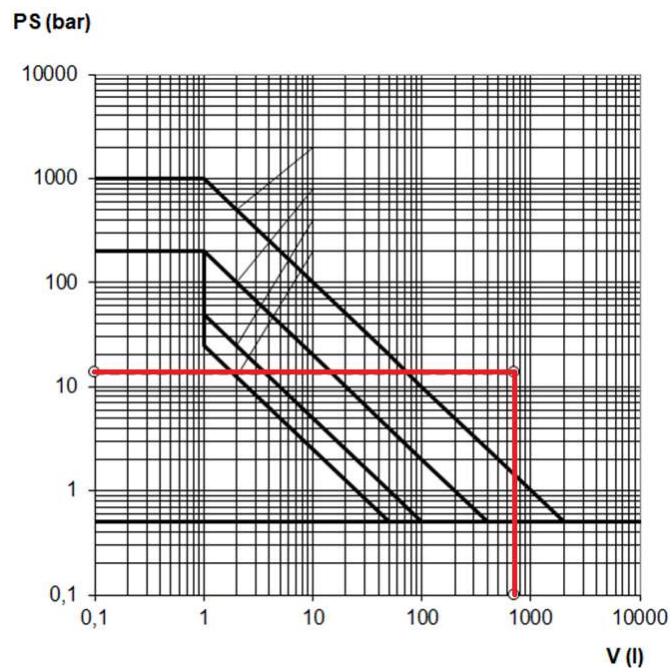
Volumen propana u izmjenjivaču

$$V_{RT} = 609 \text{ l}$$

Umnožak najvećeg dozvoljenog radnog tlaka i volumena propana

$$PS \cdot V_{RT} = 13,7 \cdot 609 = 8343,3 \text{ bar} \cdot \text{l}$$

Budući da je $V_{RT} = 609 \text{ l} > 1 \text{ l}$, a umnožak najvećeg dozvoljenog radnog tlaka i volumena plina $PS \cdot V_{RT} = 8343,3 \text{ bar} \cdot \text{l} > 25 \text{ bar} \cdot \text{l}$ te da propan spada u kategoriju fluida Grupe 1, kategorija se tlačne opreme određuje prema dijagramu 1 u Pravilniku o tlačnoj opremi.



Slika 36. Pravilnik o tlačnoj opremi, Dijagram I

Sukladno tome, izmjenjivač topline na strani propana spada u kategoriju IV.

4.6.3.2. Rashladna voda

Prema Pravilniku o tlačnoj opremi [27] voda spada u kategoriju fluida Grupe 2, što se odnosi na sve ostale fluide.

Najveći dozvoljeni radni tlak

$$PS = 13,7 \text{ bar}$$

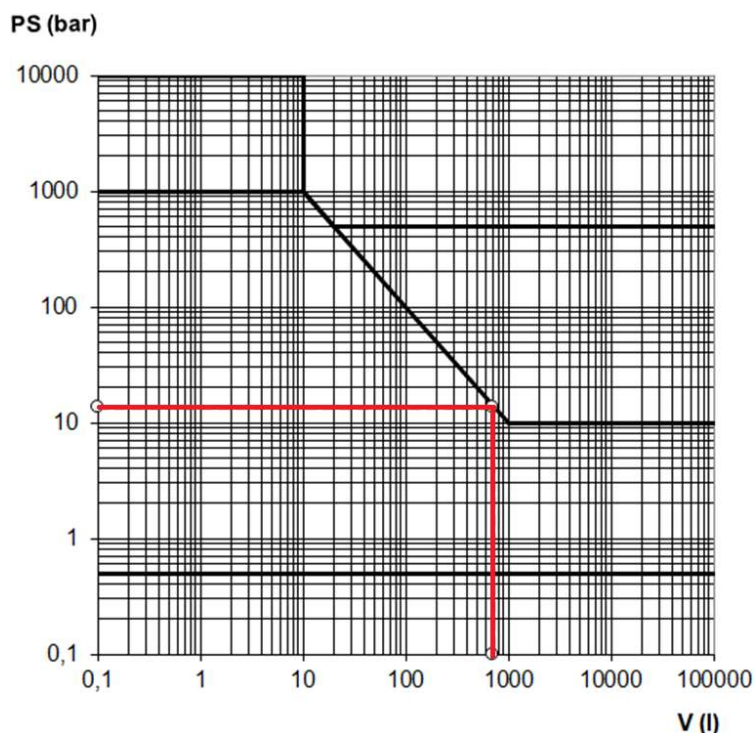
Volumen propana u izmjenjivaču

$$V_w = 707 \text{ l}$$

Umnožak najvećeg dozvoljenog radnog tlaka i volumena propana

$$PS \cdot V_w = 13,7 \cdot 707 = 9685,9 \text{ bar} \cdot \text{l}$$

Budući da je $V_w = 707 \text{ l} > 1 \text{ l}$, a umnožak najvećeg dozvoljenog radnog tlaka i volumena plina $PS \cdot V_w = 9685,9 \text{ bar} \cdot \text{l} > 50 \text{ bar} \cdot \text{l}$ te da voda spada u kategoriju fluida Grupe 2, kategorija se tlačne opreme određuje prema dijagramu 4 u Pravilniku o tlačnoj opremi.



Slika 37. Pravilnik o tlačnoj opremi, Dijagram IV

Sukladno tome, izmjenjivač topline na strani propana spada u kategoriju DIP.

4.6.4. Kategorija izmjenjivača topline

Prema Pravilniku o tlačnoj opremi ukoliko posuda sadrži više fluida, klasificira se prema fluidu koji zahtjeva najvišu kategoriju. Prema tome izmjenjivač spada u kategoriju IV. Moduli koji se koriste za ocjenu sukladnosti su B + D, B + F, G, H1.

4.7. Tehnički opis izmjenjivača

Izmjenjivač topline je tipa Shell&Tube u izvedbi s U-cijevima toplinskog učina $\Phi = 300 \text{ kW}$. U izmjenjivaču dolazi do kondenzacije radne tvari propana (R-290) pri tlaku kondenzacije $p_k = 13,7 \text{ bar}$ i temperaturi kondenzacije $\vartheta_k = 40 \text{ °C}$. Toplina se odvodi pomoću rashladne vode koja se grije s početne temperature $\vartheta_{ulaz} = 28 \text{ °C}$ na krajnju temperaturu $\vartheta_{izlaz} = 33 \text{ °C}$. Izmjenjivač se sastoji od 120 bakrenih cijevi u trokutastom rasporedu, a postavljen je u horizontalnom položaju.

Prije puštanja aparata u rad potrebno je izvršiti tlačnu probu na tlak od $19,59 \text{ bar}$.

4.7.1. Konstrukcija izmjenjivača

Konstrukcija izmjenjivača sadrži:

- prirubnicu s grlom za zavarivanje DN20 za odvod nekondenzirajućih plinova
- dva cijevna priključka $\phi 27,6/\phi 23 \times 70$ (jedan za sigurnosni ventil, drugi za odvod nekondenzirajućih plinova)
- cijevnog priključka $\phi 219,1/\phi 207,9 \times 68$ za dovod pare RT
- prirubnice s grlom za zavarivanje DN200 za dovod pare RT
- dva cijevna priključka $\phi 114,3/\phi 107,1 \times 90$ za dovod/odvod vode
- dvije prirubnice s grlom za zavarivanje DN100 za dovod/odvod vode
- cijevnog priključka $\phi 76,1/\phi 70,3 \times 90$ za odvod kondenzata RT
- prirubnice s grlom za zavarivanje DN65 za odvod kondenzata RT
- dvije podnice $\phi 700/\phi 688 \times 169$
- dva plašta $\phi 700/\phi 688$
- jedne cijevne stijenke s uvtima $\phi 830 \times 60$
- jedne ravne prirubnice DN700
- 120 U-cijevi $\phi 28/\phi 25$
- 10 segmentnih pregrada
- 2 potporne šipke $\phi 12 \times 2337$
- 4 potporne šipke $\phi 12 \times 2587$
- 18 držača razmaka $\phi 16/\phi 12 \times 244$
- 4 držača razmaka $\phi 16/\phi 12 \times 298$
- 16 držača razmaka $\phi 16/\phi 12 \times 496$
- držača razmaka $\phi 16/\phi 12 \times 546$
- 12 vijaka M30 prema HRN N.BO.019 za spajanje prirubnice i cijevne stijenke
- 24 podložne pločice prema DIN 6798 A
- 12 matica M30 HRN N.BO.012 prema za spajanje prirubnice i cijevne stijenke
- 12 matica M12 prema HRN N.BO.012 za spajanje potpornih šipki s segmentnim pregradama

4.7.2. Upotrebljeni materijali

Čelik PH 355 NH-dvije podnice, dva plašta, cijevna stijenka s uvtima, prirubnica DN700

Čelik PH 295 NH-Prirubnica s grlom za zavarivanje DN 20, Prirubnica s grlom za zavarivanje DN 200, Prirubnica s grlom za zavarivanje DN 100, Prirubnica s grlom za zavarivanje DN

65, temeljna ploča, postolje, potporna šipka 2337 mm, potporna šipka 2587 mm, držač razmaka 244 mm, držač razmaka 298 mm, držač razmaka 496 mm, držač razmaka 546 mm.

-Č 0000-Cijevni priključak DN20, Cijevni priključak DN200, Cijevni priključak DN100, Cijevni priključak DN65

-KLINGERIT-brtva podnice

5. KONDENZACIJA U PLOČASTIM IZMJENJIVAČIMA

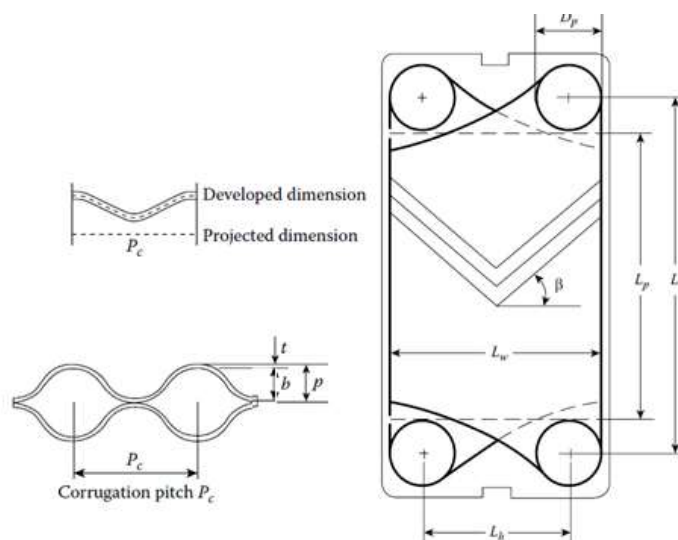
5.1. Općenito o pločastim izmjenjivačima

Pločasti izmjenjivači su kompaktni izmjenjivači topline, koji za svoju malu veličinu i nižu kupovnu cijenu daju relativno velike toplinske učine. Napravljeni su od tankih blago razdvojenih ploča između kojih struje mediji te dolazi do izmjene topline, a zbog samog načina postavljanja ploča dolazi do znatne uštede prostora. Također koriste razne tehnike povećanja koeficijenta prijelaza topline, što dodatno smanjuje potrebnu površinu izmjene topline u usporedbi s ostalim tipovima izmjenjivača. Dva su glavna tipa: rastavljivi i nerastavljivi. Kod rastavljivih dvije ploče su povezane pomoću okvira, a dodatno se ugrađuju i brtve kako bi se spriječilo curenje i međusobno miješanje medija. Prednost im je što se izmjenjivač vrlo lako može rastaviti te se može izvršiti inspekcija i čišćenje izmjenjivačkih površina, a nedostatak im je što se ne mogu primijeniti ukoliko je jedan od medija agresivan zbog opasnosti od uništavanja brtvi. Kod nerastavljivih se događa upravo suprotno, prednost im što se mogu koristiti za agresivne radne tvari, ali nemaju mogućnost čišćenja.



Slika 38. Nerastavljiva i rastavljiva izvedba pločastog izmjenjivača topline

5.2. Geometrija lamele



Slika 39. Geometrija lamele pločastog izmjenjivača [7]

Za analizu izmjene topline tijekom kondenzacije u pločastim izmjenjivačima upotrijebiti će se lamela sljedećih karakteristika.

Promjer priključaka

$$D_p = 220 \text{ mm}$$

Debljina lamele

$$t_s = 1,2 \text{ mm}$$

Horizontalna udaljenost između priključaka

$$L_h = 270 \text{ mm}$$

Efektivna širina kanala

$$L_w = L_h + D_p$$

$$L_w = 270 + 220$$

$$L_w = 490 \text{ mm}$$

Faktor povećanja

Vrijednost kod pločastih izmjenjivača kreće se između 1,15 i 1,25. [7]

$$\phi = 1,15$$

Kut žlijebova unutar pločastog izmjenjivača

$$\beta = 60^\circ$$

Dubina žlijeba

Vrijednost se kreću između 1,5 i 5 mm. [28]

$$b = 2 \text{ mm}$$

Hidraulički promjer

$$D_h = \frac{2 \cdot b}{\phi}$$

$$D_h = \frac{3 \cdot 2}{1,15}$$

$$D_h = 3,478 \text{ mm}$$

Duljina valovitosti

Okada et al. za $\beta = 60^\circ$ [29]

$$\frac{b}{l} = 0,27$$

$$l = \frac{2}{0,5}$$

$$l = 4 \text{ mm}$$

Toplinska provodnost lamele

Materijal izrade lamele je nehrđajući čelik 316 [7].

$$\lambda_{ss} = 16,5 \text{ W/mK}$$

Efektivna visina kanala nije unaprijed zadana, već će se odrediti pri dimenzioniranju pločastog izmjenjivača, a u obzir se uzima uvjet da efektivna visina kanala mora biti minimalno 1,8 puta veća od efektivne širine kanala, kako bi se izbjegla slaba distribucija fluida po površini lamele.

Uvjet primjene lamele

$$L_p > 1,8 \cdot L_w \text{ [7]}$$

Prilikom kasnijih analiza izmjene topline, pada tlaka i dimenzioniranja pločastog izmjenjivača za uvjete u programskom zadatku koristiti će se lamela s ovim geometrijskim značajkama.

5.3. Izrazi za izmjenu topline

Kondenzacija u pločastim izmjenjivačima topline funkcija je različitih parametara kao što su sadržaj pare, maseni protok, fizikalna svojstva radne tvari, geometrije samog izmjenjivača i lokalnih vrsta strujanja koja se javljaju. Visoke vrijednosti koeficijenta prijelaza topline koje se mogu postići daju veliku prednost ovakvim pločastim u odnosu na ostale tipove izmjenjivača. Mnoge studije koriste mali broj lamela prilikom istraživanja, a rezultati dobiveni u nekim slučajevima dosta odstupaju od vrijednosti koje se javljaju u standardnim tipovima izmjenjivača u kojima se nalazi 20 i više lamela. Kondenzacija je najčešće klasificirana u dvije vrste, strujanje pod utjecajem gravitacije i strujanje pod utjecajem smičnih naprezanja. Kod strujanja pod utjecajem gravitacije relativna brzina između pare i kondenzata je mala te je vrijednost Reynoldsova broja $Re_{lo} < 800$, dok se kod strujanja pod utjecajem smičnih naprezanja javlja veće naprezanje uzrokovano velikom brzinom pare po površini kondenzata, a vrijednost Reynoldsova broja $Re_{lo} > 1000$.

5.3.1. Yan et al. (1999)

Yan, Lio i Lin [30] proučavali su koeficijent prijelaza topline i pad tlaka prilikom kondenzacije R-134-a u vertikalnim pločastim izmjenjivačima topline. Bilježeni su utjecaji masenog toka, toplinskog toka, tlaka u sustavu i sadržaja pare za kut $\beta = 60^\circ$. Rezultati su pokazali da su koeficijenti prijelaza topline i pada tlaka puno veći u koordinatama s velikim sadržajem pare.

Povećanja masenog protoka i toplinskog toka uzrokovala su povećanje koeficijenta prijelaza topline u većini slučajeva.. Neke nagle promjene koeficijenta prijelaza topline zabilježene su na koordinatama sadržaja pare $x \approx 0,6$, a one se pridodaju promjeni iz laminarnog u turbulentno strujanje zbog manjeg protoka pare uzrokovanog njenim nestajanjem prilikom kondenzacije.

Također primjećuju da pri većim tlakovima kondenzacije dolazi do polaganog smanjenja koeficijenta prijelaza topline.

Koeficijent prijelaza topline

$$\alpha_{YN} = 4,118 \cdot \left(\frac{\lambda_l}{D_h}\right) \cdot Re_{ekv}^{0,4} \cdot Pr_l^{1/3}$$

5.3.2. Palmer et al. (2000)

Palmer [31] u istraživanjima mjeri prosječne Nusseltovi brojeve za radne tvari R-22 i R-290, te mješavine R-290/R-600a i R-32/R-152a tijekom kondenzacije u uvjetima malog toplinskog i masenog toka. Rezultati su uspoređeni s rezultatima ostalih relacija za prijenos topline iz literature, a rezultat je bio nezadovoljavajući.

Galileov broj

$$Ga = \frac{\rho_l \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot g \cdot D_h}{\mu_l^2}$$

Nusseltov broj za kapljevinu

$$Nu_l = 0,16 \cdot Re_l^{0,89} \cdot Pr_l^{1/3}$$

Opći koeficijent prijelaza topline

$$\alpha_{PL} = \left(\frac{\lambda_l}{D_h}\right) \cdot Nu_l^{0,387} \cdot \left(1 + \frac{12}{X_{tt}} + \frac{1}{X_{tt}^2}\right)^{0,0412} \cdot Ga^{0,346} \cdot p_r^{1,5} \cdot [-\log_{10} p_r]^{1,5}$$

Koeficijent prijelaza topline za ugljikovodike R-290, R-22 i R-290/R-600a

$$\alpha_{PL} = \left(\frac{\lambda_l}{D_h}\right) \cdot Nu_l^{0,298} \cdot Ga^{0,346} \cdot p_r^{1,5} \cdot [-\log_{10} p_r]^{1,5}$$

5.3.3. Thonon & Bontemps (2002)

Thonon & Bontemps [32] proučavali su potpunu kondenzaciju ugljikovodika (pentan, butan i propan) te dvije mješavine (propan/butan) u pločastim izmjenjivačima topline. Mjerenjem su zaključili da izrazi za filmsku kondenzaciju unutar cijevi ne daju zadovoljavajuće rezultate, te

razvijaju potpuno novu relaciju za čistu smjesu i mješavinu ugljikovodika. Za mješavinu navode da prijenos mase negativno utječe na prijenos topline i drastično smanjuje koeficijent prijelaza topline.

Koeficijent prijelaza topline za kapljevinu

$$\alpha_{lo} = 0,347 \cdot \left(\frac{\lambda_l}{D_h} \right) \cdot Re_{lo}^{0,653} \cdot Pr_l^{1/3}$$

Koeficijent prijelaza topline

$$\alpha_{TB} = \alpha_{lo} \cdot 1564 \cdot Re_{ekv}^{-0,76}$$

5.3.4. Han et al. (2003)

Han [31] provodi opsežna istraživanja mjereći koeficijente prijelaza topline i pada tlaka tijekom kondenzacije u pločastim izmjenjivačima za različite kutove ($\beta = 45^\circ, 55^\circ, 70^\circ$) koristeći radne tvari R-410A i R-22., te pokazuje da na koeficijent prijelaza topline malo utječe promjena masenog toka i temperatura kondenzacije. Kada je kut nagiba manji, taj efekt se povećava. S druge strane koeficijent prijelaza topline se smanjuje kako se sve više pare pretvara u kapljevinu.

Uvodi koeficijente Ge_1 i Ge_2 koji su funkcije geometrije izmjenjivača.

Koeficijent Ge_1

$$Ge_1 = 11,22 \cdot \left(\frac{l}{D_h} \right)^{-2,83} \cdot \left(\frac{\pi \cdot \beta}{2} \right)^{-4,5}$$

Koeficijent Ge_2

$$Ge_2 = 0,35 \cdot \left(\frac{l}{D_h} \right)^{0,23} \cdot \left(\frac{\pi \cdot \beta}{2} \right)^{1,48}$$

Koeficijent prijelaza topline

$$\alpha_{HN} = Ge_1 \cdot \left(\frac{\lambda_l}{D_h} \right) \cdot Re_{ekv}^{Ge_2} \cdot Pr_l^{1/3}$$

5.3.5. Wurfel & Ostrowski (2004)

Wurfel & Ostrowski [31] unutar svoje relacije za koeficijent prijelaza topline uzimaju u obzir utjecaj različitih fizikalnih svojstava, protoka i geometrije same lamele na prijenos topline i promjene tlaka tijekom potpune kondenzacije vodene pare i n-heptana. Primijećeno je da se intenzitet prijenosa topline povećava 3-4 puta u odnosu na Nusseltovu teoriju za laminarnu kondenzaciju.

Table 1. Empirical constants of Würfel and Ostrowski (2004) prediction method.

Chevron angle (°)	C	m	k
60	3.77	0.43	0.14
45	3.2	0.46	0.3
30	0.325	0.62	0.4

Slika 40. Würfel & Ostrowski (2004) konstante [31]

Ekvivalentna gustoća masenog toka

$$G_{ekv,WO} = G \left[(1 - x) + x \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^k \right]$$

Ekvivalentni Reynoldsov broj

$$Re_{ekv,WO} = \frac{G_{ekv} \cdot D_h}{\mu_l}$$

Koeficijent prijelaza topline

$$\alpha_{WO} = C \cdot \left(\frac{\lambda_l}{D_h} \right) \cdot Re_{ekv,WO}^m \cdot Pr_l^{1/3}$$

5.3.6. Usporedba izraza za izmjenu topline

Računanje koeficijenta prijelaza topline tijekom kondenzacije preko različitih autora daje različite rezultate za istu geometriju lamele i početne uvjete. Prilikom usporedbe kao radna tvar korišten je propan (R290), a kao rashladni medij voda.

Izrazi za izmjenu topline su simulirani u programu Excel, počevši od sadržaja pare $x = 0,01$ do $x = 0,99$, s korakom $\Delta x = 0,01$.

Interval sadržaja pare

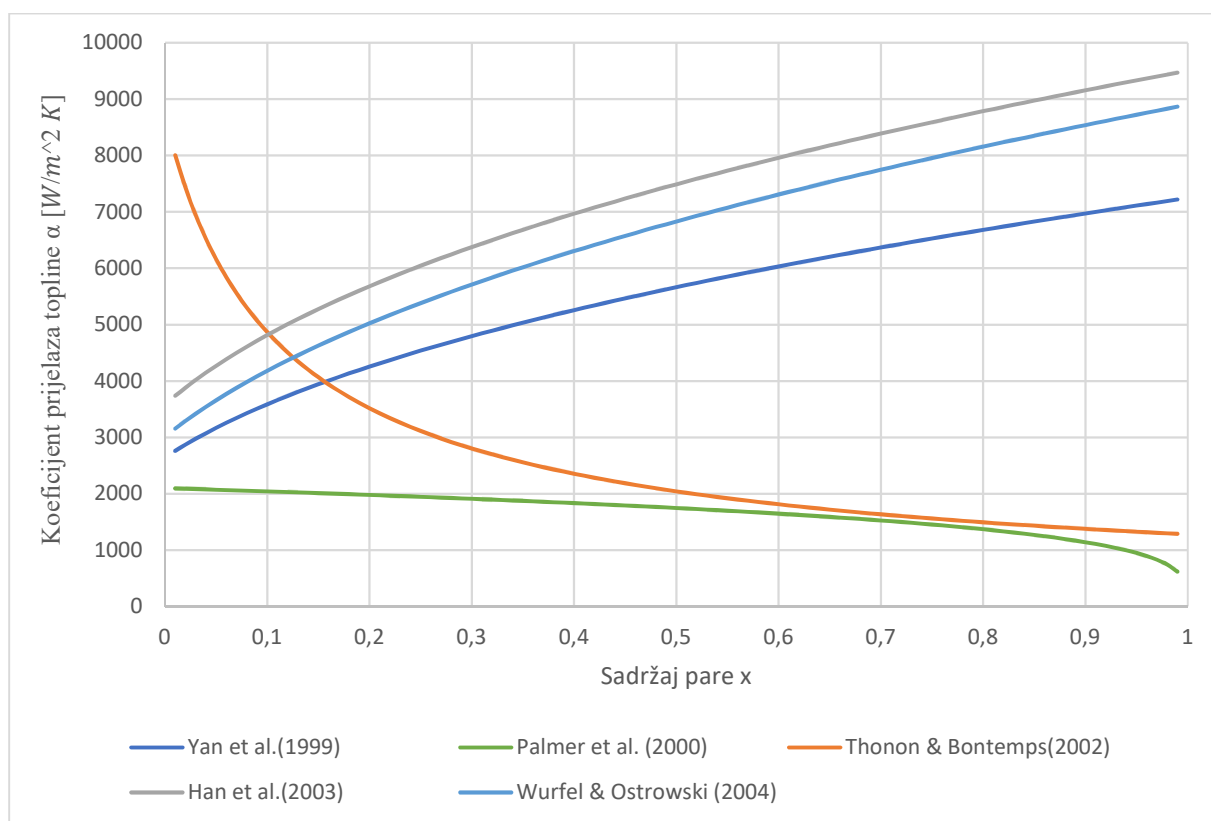
$$x = 0,01 - 0,99$$

Geometrija i broj kanala, gustoća masenog toka, koeficijent prijelaza topline na strani rashladne vode i način proračuna potrebne površine za izmjenu topline korištene u usporedbi izmjene topline izračunate su i objašnjene u poglavlju 6.1.2.

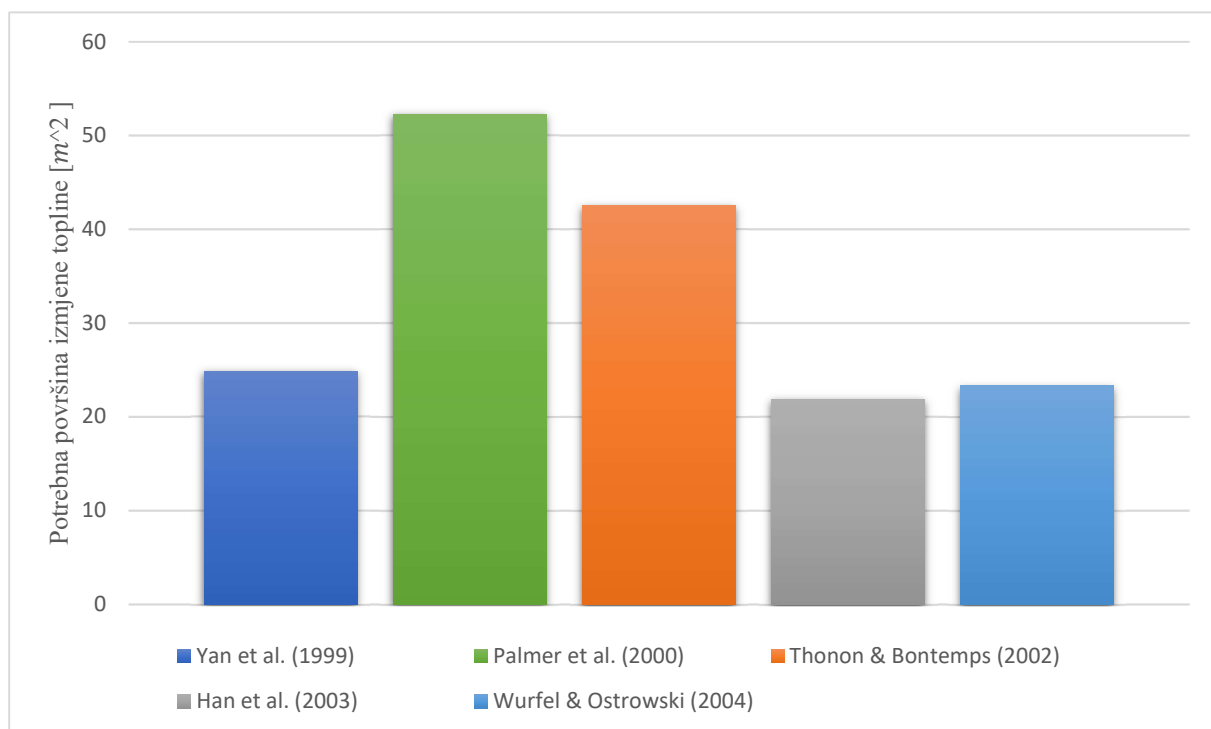
Gustoća masenog toka

$$G = 34,44 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Potrebna površina za izmjenu topline prvo je izračunata za jednu lamelu, a vrijednosti su zatim pomnožene s brojem lamela u izmjenjivaču.



Slika 41. Grafički prikaz koeficijenta prijelaza topline u funkciji sadržaja pare za različite autore



Slika 42. Grafički prikaz potrebnih površina izmjene topline za različite autore

5.4. Pad tlaka

Pad tlaka unutar vertikalnog pločastog izmjenjivača uključuje, po redu unutar jednadžbe ukupnog pada tlaka, pad tlaka zbog trenja, ubrzanja protoka i gravitacije.

$$-\left[\frac{dp}{dz}\right] = -\left[\frac{dp}{dz}\right]_f - \left[\frac{dp}{dz}\right]_a - \left[\frac{dp}{dz}\right]_g$$

Prilikom ove analize, padovi tlaka izazvani ubrzanjem protoka i gravitacijom će se zanemariti, tako da će ukupan pad tlaka biti jednak onome koje izaziva trenje.

$$\left[\frac{dp}{dz}\right]_a = \left[\frac{dp}{dz}\right]_g = 0$$

$$-\left[\frac{dp}{dz}\right]_{PI} = -\left[\frac{dp}{dz}\right]_f$$

U nastavku su prezentirani izrazi za pad tlaka tijekom kondenzacije za različite autore, prikazani preko Fanningova faktora otpora.

5.4.1. Yan et al. (1999)

Faktor otpora trenja [32]

$$f_{YN} = 97,75 \cdot Bo^{0,5} \cdot Re_l^{-0,4} \cdot Re_{ekv}^{-0,0467} \cdot p_r^{0,8}$$

5.4.2. Lee et al. (1999)

Faktor otpora trenja [32]

$$f_{LE} = 49,13 \cdot Re_{lo}^{-0,4074} \cdot Re_{ekv}^{-0,4386}$$

5.4.3. Han et al. (2003)

Uvodi koeficijente Ge_3 i Ge_4 koji su funkcije geometrije izmjenjivača [31]

Koeficijent Ge_3

$$Ge_3 = 3521,1 \cdot \left(\frac{l}{D_h}\right)^{4,17} \cdot \left(\frac{\pi \cdot \beta}{2}\right)^{-7,75}$$

Koeficijent 3

$$Ge_3 = -1,024 \cdot \left(\frac{l}{D_h}\right)^{0,0925} \cdot \left(\frac{\pi \cdot \beta}{2}\right)^{-1,3}$$

Faktor otpora

$$f_{HN} = Ge_3 \cdot Re_{ekv}^{Ge_4}$$

5.4.4. Usporedba izraza za pad tlaka

U usporedbi izraza za pad tlaka korištene su duljine kao dijelovi efektivne visine izmjenjivača između različitih koordinata sadržaja pare izračunate u kasnijem proračunu dimenzioniranja pločastog izmjenjivača.

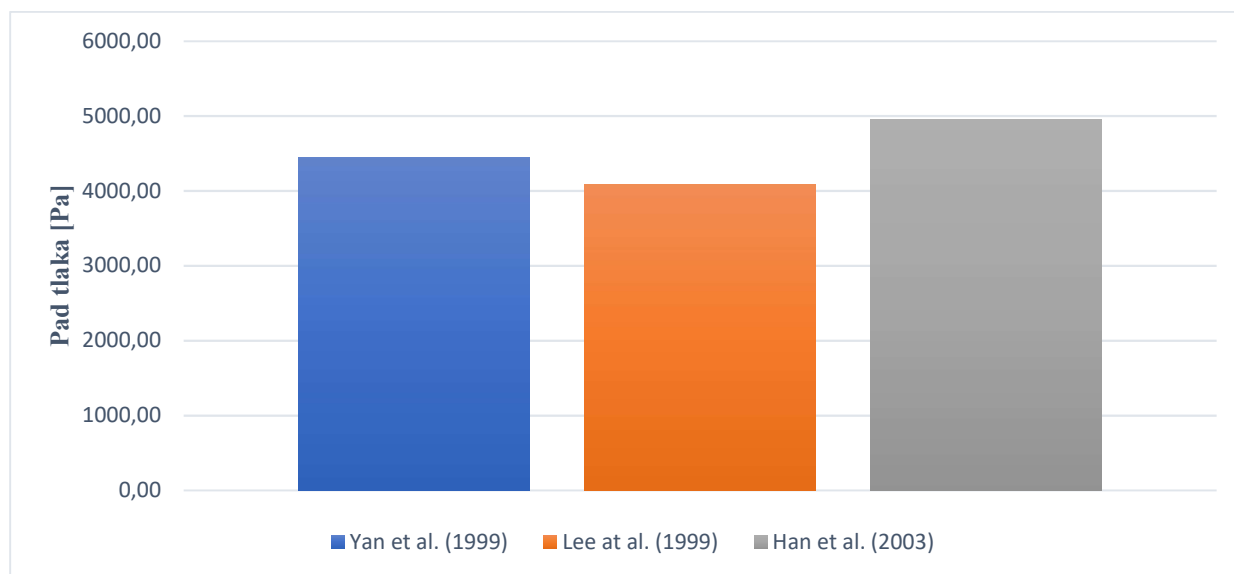
Izrazi koji se odnose na dinamičku viskoznost, gustoću i faktori otpora proračunati su za srednji sadržaj pare između dviju koordinata sadržaja pare čime se dobije ukupan jedinični pad tlaka na pojedinom dijelu, koji pomnožen s duljinom izražava konačan pad tlaka tog dijela.

Izrazi za izmjenu topline su simulirani u programu Excel, počevši od sadržaja pare $x = 0,01$ do $x = 0,99$, s korakom $\Delta x = 0,1$.

Geometrija i gustoća masenog toka dane su u poglavlju 6.1.

Gustoća masenog toka za jedan kanal

$$G_{kan} = 34,44 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

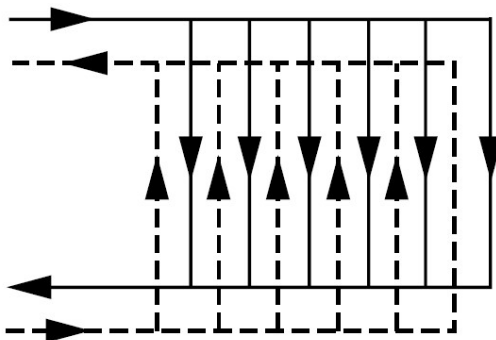


Slika 43. Grafički prikaz pada tlaka za različite autore

6. DIMENZIONIRANJE PLOČASTOG IZMJENJIVAČA

6.1. Termodinamički proračun

Pločasti izmjenjivač biti će izveden kao jednoprolazni protusmjerni izmjenjivač u U-izvedbi.



Slika 44. Protusmjerna U-izvedba pločastog izmjenjivača

6.1.1. Koeficijent prijelaza topline na strani rashladne vode

Pretpostavljena brzina strujanja vode

$$w_w = 0,5 \text{ m/s}$$

Protočna površina kanala

$$A_{kan} = L_w \cdot b$$

$$A_{kan} = 0,490 \cdot 0,002$$

$$A_{kan} = 0,00098 \text{ m}^2$$

Volumni protok će se računati s pretpostavljenom brzinom vode w_w .

Volumni protok u jednom kanalu

$$q_{v,w,kan} = A_{kan} \cdot w_w$$

$$q_{v,w,kan} = 0,00098 \cdot 0,5$$

$$q_{v,w,kan} = 0,00049 \text{ m}^3/\text{s}$$

Broj kanala će se izračunati dijeljenjem ukupnog protočnog volumena s protočnim volumenom za pretpostavljenu brzinu w_w

Potreban broj kanala

$$N_{kan} = \frac{q_{v,w}}{q_{v,w,kan}}$$

$$N_{kan} = \frac{0,0144}{0,00049}$$

$$N_{kan} = 29,42$$

Odabrani broj kanala za strujanje RT i vode unutar pločastog izmjenjivača je $N_{kan} = 29$.

Maseni protok za odabrani broj kanala

$$q_{m,w,kan} = \frac{q_{m,w}}{N_{kan}}$$

$$q_{m,w,kan} = \frac{14,35}{29}$$

$$q_{m,w,kan} = 0,495 \text{ kg/s}$$

Gustoća masenog toka vode

$$G_{w,kan} = \frac{q_{m,w,kan}}{A_{kan}}$$

$$G_{w,kan} = \frac{0,495}{0,00098}$$

$$G_{w,kan} = 505,1 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Reynoldsov broj

$$Re = \frac{G_{w,kan} \cdot D_h}{\mu_w}$$

$$Re = \frac{505,1 \cdot 0,003478}{0,0007889}$$

$$Re = 2226,9$$

U izrazu za računanje Nusseltove značajke nalaze se konstante C_h i n koje ovise o veličini Reynoldsove značajke te o nagibu žlijebova unutar pločastog izmjenjivača.

Chevron Angle (degree)	Heat Transfer			Pressure Loss		
	Reynolds Number	C_h	n	Reynolds Number	K_p	m
≤ 30	≤ 10	0.718	0.349	< 10	50.000	1.000
	> 10	0.348	0.663	10–100	19.400	0.589
				> 100	2.990	0.183
45	< 10	0.718	0.349	< 15	47.000	1.000
	10–100	0.400	0.598	15–300	18.290	0.652
	> 100	0.300	0.663	> 300	1.441	0.206
50	< 20	0.630	0.333	< 20	34.000	1.000
	20–300	0.291	0.591	20–300	11.250	0.631
	> 300	0.130	0.732	> 300	0.772	0.161
60	< 20	0.562	0.326	< 40	24.000	1.000
	20–400	0.306	0.529	40–400	3.240	0.457
	> 400	0.108	0.703	> 400	0.760	0.215
≥ 65	< 20	0.562	0.326	50	24.000	1.000
	20–500	0.331	0.503	50–500	2.800	0.451
	> 500	0.087	0.718	> 500	0.639	0.213

Slika 45. Tablica koeficijenata za jednofazno strujanje kod pločastih izmjenjivača [7]

Za kut nagiba žlijebova $\beta = 60^\circ$ i vrijednost Reynoldsove značajke $Re > 400$ konstante C_h i n imaju sljedeće vrijednosti:

$$C_h = 0,108$$

$$n = 0,703$$

Nusseltov broj

$$Nu_w = C_h \cdot G_{w,kan}^n \cdot Pr^{1/3}$$

$$Nu_w = 0,108 \cdot 505,1^{0,703} \cdot 5,35^{1/3}$$

$$Nu_w = 42,6$$

Koeficijent prijelaza topline na strani vode

$$\alpha_v = \frac{Nu_w \cdot \lambda_w}{D_h}$$

$$\alpha_v = \frac{42,6 \cdot 0,6164}{0,003478}$$

$$\alpha_v = 7553,6 \text{ W/m}^2\text{K}$$

6.1.2. Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari i efektivna visina lamele

Proračun ukupne efektivne visine lamele provest će se tablično prema izrazima koje je razvio Yan et al (1999) [30], za različite sadržaje pare prema poglavlju 5.3.1 da bi se dobili izlazne podatke za izračun potrebne površine izmjene topline (koeficijenti prijelaza topline na strani

radne tvari, koeficijenti prolaza topline, te srednji koeficijent prolaza topline između dviju koordinata sadržaja pare).

Ovdje će se tablično prikazati najvažnije vrijednosti koje vode do potrebne površine izmjene topline za jednu lamelu.

Korak između dviju koordinata sadržaja pare je $\Delta x = 0,1$, osim za prvu i zadnju dionicu gdje je $\Delta x = 0,09$, jer pri $x = 0$ i $x = 1$ neki od međurezultata daju neodređene vrijednosti.

Nakon određivanja koraka koordinata sadržaja pare, te izračuna koeficijenta prijelaza topline na unutarnjoj strani cijevi za svaku zadanu koordinatu sadržaja pare, prethodno dobivenim koeficijentom prijelaza topline na strani rashladne vode, zadanom debljinom i lamele i toplinskom provodnošću materijala lamele (nehrđajući čelik) dobijemo koeficijent prolaza topline.

Koeficijent prolaza topline

$$k_x = \left(\frac{1}{\alpha_{u,x}} + \left(\frac{s}{\lambda_{ss}} \right) + \frac{1}{\alpha_{v,x}} \right)^{-1}$$

Sljedeći korak je zbrajanje koeficijenata za dvije susjedne koordinate sadržaja pare, te njihovo aritmetičko osrednjavanje.

Srednji koeficijent prolaza topline između dva sadržaja pare

$$\bar{k} = \frac{k_x + k_{x+\Delta x}}{2}$$

Geometrija pločastog izmjenjivača je određena efektivnom širinom, a prilikom proračuna će se računati potrebna površina za izmjenu topline. Između dviju koordinata sadržaja pare u jednom kanalu uspostavlja se toplinska bilanca između topline koja nastaje kondenzacijom i umnoška potrebne površine izmjene topline, koeficijenta prolaza topline na tom dijelu i srednje logaritamske temperaturne razlike. Dijeljenjem dobivene površine sa zadanom efektivnom širinom kanala dobit ćemo duljinu na tom dijelu, a ponavljajući proračun između svih zadanih koordinata pare, te sumiranjem dobivenih duljina, dobit ćemo ukupnu potrebnu efektivnu visinu lamele. Tablični proračun je preporučeno početi od najniže vrijednosti sadržaja pare x kako bi se dobile pozitivne vrijednosti površina ΔA .

Maseni protok radne tvari za odabrani broj kanala

$$q_{m,RT,kan} = \frac{q_{m,RT}}{N_{kan}}$$

$$q_{m,RT,kan} = \frac{0,979}{29}$$

$$q_{m,RT,kan} = 0,0337 \text{ kg/s}$$

Gustoća masenog toka radne tvari

$$G_{w,kan} = \frac{q_{m,RT,kan}}{A_{kan}}$$

$$G_{w,kan} = \frac{0,0337}{0,00098}$$

$$G_{w,kan} = 34,44 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Koeficijent prolaza topline

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_u} + \left(\frac{s}{\lambda_{ss}}\right) + \frac{1}{\alpha_v}$$

Srednji koeficijent prolaza topline između dva sadržaja pare

$$\bar{k} = \frac{k_1 + k_2}{2}$$

Potrebna površina lamele

$$\Delta A_{\Delta x} = \frac{\Delta q_{m,kond,12} \cdot r}{k \cdot \Delta \vartheta_m}$$

$$\Delta A_{\Delta x} = \frac{(q_{m,kond,x} - q_{m,kond,x+\Delta x}) \cdot r}{k \cdot \Delta \vartheta_m}$$

Sadržaj pare	Maseni protok kondenzata po kanalu	Koeficijent prijelaza topline	Koeficijent prolaza topline	Srednji koeficijent prolaza topline	Potrebna površina lamele
$x[\text{kg/kg}]$	$q_{m,kond}[\text{kg/s}]$	$\alpha_u[\text{W/m}^2\text{K}]$	$k[\text{W/m}^2\text{K}]$	$\bar{k}[\text{W/m}^2\text{K}]$	$A_{lam}[\text{m}]$
0,01	0,033415	2760,84	1762,66	1914,5591	0,0524
0,10	0,030377	3586,72	2066,45	2169,3529	0,0514
0,20	0,027002	4255,72	2272,25	2344,9022	0,0476
0,30	0,023627	4795,54	2417,55	2473,5017	0,0451
0,40	0,020251	5256,84	2529,45	2574,7908	0,0433
0,50	0,016876	5664,24	2620,13	2658,1346	0,0420
0,60	0,013501	6031,85	2696,14	2728,7712	0,0409
0,70	0,010126	6368,60	2761,40	2789,9373	0,0400
0,80	0,006750	6680,56	2818,47	2843,7755	0,0392
0,90	0,003375	6972,07	2869,08	2889,6122	0,0347
0,99	0,000338	7219,63	2910,14	Potrebna površina $A_{lam} = 0,4365 \text{ m}^2$	

Tablica 5. Tablični proračun koeficijenata prijelaza topline, prolaza topline i potrebne površine lamele

Minimalna efektivna visina lamele

$$L_p = \frac{A_{lam}}{L_w}$$

$$L_p = \frac{0,4365}{0,49}$$

$$L_p = 0,9 \text{ m}$$

Uvjet primjene

$$L_p > 1.8 \cdot L_w$$

$$0,9 > 1.8 \cdot 0,49$$

$$0,9 > 0,88$$

Uvjet primjene lamele je zadovoljen.

6.1.3. Površina izmjene topline

Ukupan broj kanala biti će jednak zbroju kanala za strujanje radne tvari i rashladne vode.

Ukupan broj kanala

$$N_{kan,uk} = 2 \cdot N_{kan}$$

$$N_{kan,uk} = 2 \cdot 29$$

$$N_{kan,uk} = 58$$

Potreban broj lamela za izmjenu topline biti će za 1 manji od ukupnog broja kanala, jer dvije rubne lamele ne sudjeluju u izmjeni topline.

Broj lamela

$$N_{lam,uk} = N_{kan,uk} - 1$$

$$N_{lam,uk} = 58 - 1$$

$$N_{lam,uk} = 57$$

Ukupna površina izmjene topline biti će jednaka umnošku broja lamela i površine jedne lamele.

Ukupna površina izmjene topline

$$A_{lam,uk} = A_{lam} \cdot N_{lam,uk}$$

$$A_{lam,uk} = 0,436 \cdot 57$$

$$A_{lam,uk} = 24,85 \text{ m}^2$$

6.2. Hidraulički proračun

6.2.1. Pad tlaka na strani rashladne vode

6.2.1.1. Pad tlaka u kanalima

U izrazu za računanje faktora trenja f nalaze se konstante K_p i m koje ovise o veličini Reynoldsove značajke te o nagibu žlijebova unutar pločastog izmjenjivača.

Za kut nagiba žlijebova $\beta = 60^\circ$ i vrijednost Reynoldsove značajke $Re > 400$ konstante K_p i m imaju sljedeće vrijednosti (Slika 45.)

$$K_p = 0,76$$

$$m = 0,215$$

Faktor trenja

$$f = \frac{K_p}{Re^m}$$

$$f = \frac{0,76}{2226,9^{0,215}}$$

$$f = 0,145$$

Broj prolaza

$$N_p = 1$$

Uzdužni pad tlaka [7](Slika 8)

$$\Delta p_{kan,w} = 4 \cdot f \cdot \frac{L_p \cdot N_p}{D_h} \cdot \frac{G_{w,kan}^2}{2 \cdot \rho_w}$$

$$\Delta p_{kan,w} = 4 \cdot 0,145 \cdot \frac{0,9 \cdot 1}{0,003478} \cdot \frac{505,1^2}{2 \cdot 995,54}$$

$$\Delta p_{kan,w} = 19023,5 \text{ Pa}$$

6.2.1.2. Pad tlaka u priključcima

Priključci za ulaz i izlaz vode su istih dimenzija, te će voda u njima strujati istom brzinom, pa se ukupan pad tlaka može računati zajedno zbrajanjem koeficijenata otpora.

Koeficijent otpora strujanju na ulazu u priključak [15]

$$\xi_{pr,w,ul} = 0,5$$

Koeficijent otpora strujanju na izlazu iz priključka [15]

$$\xi_{pr,w,izl} = 1$$

Gustoća masenog toka u priključku

$$G_{w,pr} = \frac{q_{m,w}}{\frac{D_p^2 \cdot \pi}{4}}$$

$$G_{w,pr} = \frac{14,35}{\frac{0,22^2 \cdot \pi}{4}}$$

$$G_{w,pr} = 377,5 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Pad tlaka na priključcima [7]

$$\Delta p_{pr,w} = (\xi_{pr,w,ul} + \xi_{pr,w,izl}) \cdot \frac{G_{w,pr}^2}{2 \cdot \rho_w}$$

$$\Delta p_{pr,w} = 1,5 \cdot \frac{377,5^2}{2 \cdot 995,54}$$

$$\Delta p_{pr,w} = 107,5 \text{ Pa}$$

6.2.1.3. Ukupan pad tlaka na strani rashladne vode

Ukupan pad tlaka na strani vode biti će jednak zbroju pada tlaka u kanalima i padu tlaka u priključcima.

$$\Delta p_{uk,w} = \Delta p_{kan,w} + \Delta p_{pr,w}$$

$$\Delta p_{uk,w} = 19023,5 + 107,5$$

$$\Delta p_{uk,w} = 19131 \text{ Pa}$$

6.2.2. Pad tlaka na strani radne tvari

6.2.2.1. Pad tlaka u kanalima

Pad tlaka u kanalima izračunat je preko izraza autora Lee et al. (1999) [33] čiji je izraz dan za faktor trenja prikazan u poglavlju 5.4.2. Pad tlaka se računa tablično između dviju koordinata sadržaja pare, pri čemu se za taj dio uzima osrednjeni sadržaj pare, za kojega se računaju relevantne vrijednosti koje vode do faktora otpora.

Sadržaj pare	Srednji sadržaj pare	Ekvivalentni Reynoldsov broj	Faktor otpora	Udaljenost između dvije koordinate	Pad tlaka
$x[kg/kg]$	$x[kg/kg]$	$Re_{ekv}[-]$	$f[-]$	$\Delta L[m]$	$\Delta p[Pa]$
0,01	0,055	2365,579682	1762,66	0,1070	123,73
0,10	0,15	3943,391732	2066,45	0,1049	246,74
0,20	0,25	5604,222112	2272,25	0,0971	320,68
0,30	0,35	7265,094654	2417,55	0,0920	377,06
0,40	0,45	8925,925033	2529,45	0,0884	423,78
0,50	0,55	10586,75541	2620,13	0,0856	464,33
0,60	0,65	12247,62795	2696,14	0,0834	500,55
0,70	0,75	13908,45833	2761,40	0,0816	533,54
0,80	0,85	15569,33088	2818,47	0,0800	564,03
0,90	0,945	17147,10076	2869,08	0,0709	531,98
0,99	Ukupan pad tlaka $\Delta p_{kan,RT} = 4086,4 Pa$				

6.2.2.2. Pad tlaka u priključcima

Gustoća masenog toka na priključcima

$$G_{RT,pr} = \frac{q_{m,RT}}{\frac{D_p^2 \cdot \pi}{4}}$$

$$G_{RT,pr} = \frac{0,9788}{\frac{0,22^2 \cdot \pi}{4}}$$

$$G_{RT,pr} = 25,74 kg/m^2s$$

Pad tlaka u priključku pare

Koeficijent otpora strujanju na ulazu u priključak [15]

$$\xi_{pr,w,ul} = 0,5$$

$$\Delta p_{pr,para RT} = \xi_{pr,w,ul} \cdot \frac{G_{w,pr}^2}{2 \cdot \rho_w}$$

$$\Delta p_{pr,para RT} = 0,5 \cdot \frac{25,74^2}{2 \cdot 3,02}$$

$$\Delta p_{pr,para RT} = 0,53 Pa$$

Pad tlaka u priključku kondenzata

Koeficijent otpora strujanju na ulazu u priključak [15]

$$\xi_{pr,w,izl} = 1$$

$$\Delta p_{pr,kond RT} = \xi_{pr,w,ul} \cdot \frac{G_{w,pr}^2}{2 \cdot \rho_w}$$

$$\Delta p_{pr,kond RT} = 1 \cdot \frac{25,74^2}{2 \cdot 467,3}$$

$$\Delta p_{pr,kond RT} = 82,3 Pa$$

6.2.2.3. Ukupan pad tlaka na strani radne tvari

Ukupan pad tlaka na strani radne tvari biti će jednak zbroju pada tlaka u kanalima i padu tlaka u priključcima.

$$\Delta p_{uk,RT} = \Delta p_{kan,RT} + \Delta p_{pr,para RT} + \Delta p_{pr,kond RT}$$

$$\Delta p_{uk,RT} = 4086,4 + 0,53 + 82,3$$

$$\Delta p_{uk,RT} = 4169,3 Pa$$

6.2.3. Ukupan pad tlaka na izmjenjivaču

Ukupan pad tlaka na izmjenjivaču biti će jednak zbroju padova tlaka na strani radne tvari i rashladne vode

$$\Delta p_{uk,PI} = \Delta p_{uk,w} + \Delta p_{uk,RT}$$

$$\Delta p_{uk,PI} = 19131 + 4169,3$$

$$\Delta p_{uk,PI} = 23300,3 Pa$$

7. FINANCIJSKA ANALIZA

7.1. Investicijski troškovi

Na internetskoj domeni [34] pomoću kalkulatora koji se temelji na izrazima korištenima u [35] na osnovu površina izmjene topline izračunate su približne kupovne cijene dimenzioniranih Shell&Tube i pločastih izmjenjivača za uvjete dane u programskom zadatku.

Površina izmjene topline Shell&Tube izmjenjivača

$$A_{S\&T} = 53,97 \text{ m}^2$$

Površina izmjene topline pločastog izmjenjivača

$$A_{PI} = 24,85 \text{ m}^2$$

Kupovna cijena je izražena preko vrijednosti dolar (\$) te je pretvorena u vrijednost kuna (kn) po srednjem tečaju na dan 14.2.2017, a iznosi $1\$ = 6,02 \text{ kn}$.

Kupovna cijena Shell&Tube izmjenjivača

$$K_{S\&T} = 52729 \text{ kn}$$

Kupovna cijena pločastog izmjenjivača

$$K_{PI} = 15634 \text{ kn}$$

7.2. Pogonski troškovi

Pogonski troškovi za financijsku analizu uzeti će u obzir troškove za pogon pumpe potrebne za osiguravanje protoka vode kroz izmjenjivače, a koja ovisi o padu tlaka na strani vode pri prolasku kroz izmjenjivač.

Za potrebe analize pretpostaviti će se rad izmjenjivača u dvije smjene (16 h), tijekom 330 dana u godini.

Ukupan broj sati u radu

$$t_h = 5280 \text{ h}$$

Cijena struje

$$C = 1 \text{ kn/kWh}$$

Potrebna snaga za pogon pumpe izračuna je pomoću volumnog protoka, pada tlaka na pojedinom izmjenjivaču i korisnosti same pumpe.

Korisnost pumpe je pretpostavljena i ima vrijednost $\eta_{kor} = 0,7$

Volumni protok vode

$$q_{v,w} = 0,0144 \text{ m}^3/\text{s}$$

7.2.1. Potrebna snaga za pogon pumpe kod Shell&Tube izmjenjivača

Pad tlaka na strani vode u Shell&Tube izmjenjivaču

$$\Delta p_{uk,w,S\&T} = 11445,16 \text{ Pa}$$

Potrebna snaga za pogon pumpe

$$P_{P,S\&T} = \frac{q_{v,w} \cdot \Delta p_{uk,w,S\&T}}{\eta_{kor}}$$

$$P_{P,S\&T} = \frac{0,0144 \cdot 11445,16}{0,7}$$

$$P_{P,S\&T} = 236 \text{ W} = 0,236 \text{ kW}$$

7.2.2. Potrebna snaga za pogon pumpe kod pločastog izmjenjivača

Pad tlaka na strani vode u pločastom izmjenjivaču

$$\Delta p_{uk,w,PI} = 19131 \text{ Pa}$$

Potrebna snaga za pogon pumpe

$$P_{P,PI} = \frac{q_{v,w} \cdot \Delta p_{uk,w,S\&T}}{\eta_{kor}}$$

$$P_{P,PI} = \frac{0,0144 \cdot 19131}{0,7}$$

$$P_{P,PI} = 393 \text{ W} = 0,393 \text{ kW}$$

7.2.3. Ukupni pogonski troškovi na godišnjoj razini

Ukupni godišnji troškovi za oba tipa izmjenjivača biti će jednaki cijeni potrošnje električne energije za pogon pumpe.

7.2.3.1. Godišnji trošak za pogon Shell&Tube izmjenjivača

Godišnja cijena pogona pumpe

$$T_{S\&T} = C \cdot t_g \cdot P_{P,S\&T}$$

$$T_{S\&T} = 1 \cdot 5280 \cdot 0,236$$

$$T_{S\&T} = 1246 \text{ kn}$$

7.2.3.2. Godišnji trošak za pogon pločastog izmjenjivača

Godišnja cijena pogona pumpe

$$T_{PI} = C \cdot t_g \cdot P_{P,S\&T}$$

$$T_{PI} = 1 \cdot 5280 \cdot 0,393$$

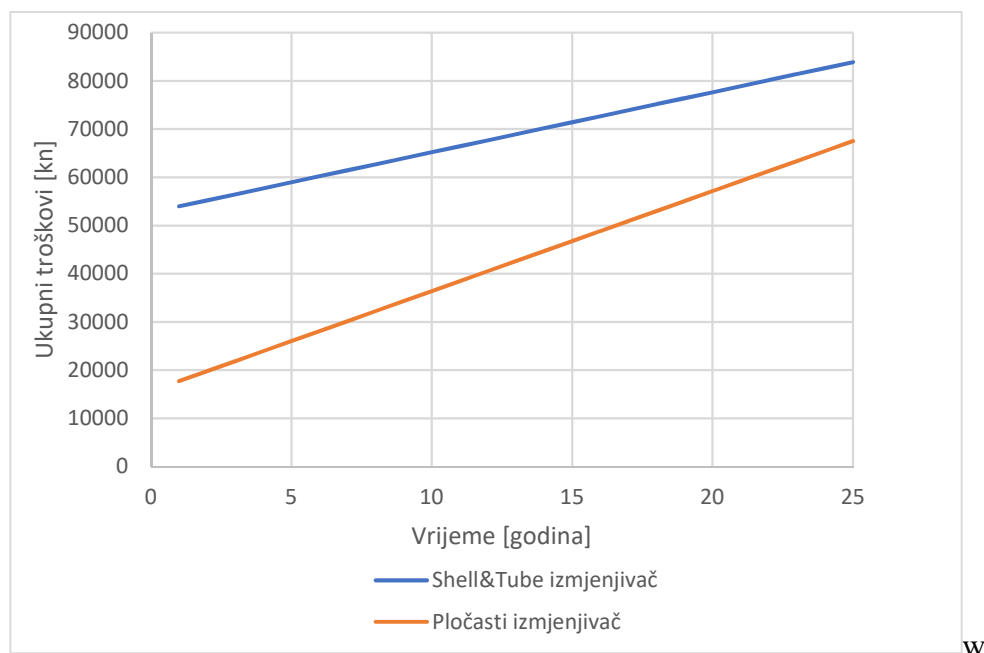
$$T_{PI} = 2075 \text{ kn}$$

7.3. Usporedba ukupnog troška kroz vremenski period

Očekivani vijek trajanja izmjenjivača je 25 godina s pretpostavkom da se nalazi u unutarnjem prostoru pa se ta vrijednost uzima kao referentna u usporedbi ukupnih troškova.

Vremenski period

$$t_{vp} = 25 \text{ godina}$$



Slika 46. Grafički prikaz ukupnih troškova u funkciji godina

Krivulja troškova pločastog izmjenjivača strmija je od onoga za Shell&Tube zbog većih troškova za pogon pumpe, što je posljedica većeg pada tlaka na izmjenjivaču, međutim zbog jeftinijeg investicijskog troška za očekivani vijek trajanja pločasti izmjenjivač će biti optimalan izbor.

8. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani različiti izrazi za izračun koeficijenata prijelaza topline i pada tlaka kod Shell&Tube i pločastih izmjenjivača. Prilikom usporedbe izraza koeficijenata prijelaza topline za oba tipa izmjenjivača dolazi se do zaključka da će pri istim zadanim uvjetima i geometriji svaki od tih izraza dati različitu potrebnu površinu za izmjenu topline, pri čemu se omjeri površina za neke izraze razlikuju i do 3 puta. Mora se naglasiti kako za kondenzaciju unutar zatvorene geometrije još nema univerzalnog načina kojim bi se računalo koeficijent prijelaza topline, već bi tijekom konstruiranja trebalo obratiti pažnju na vrstu radne tvari, geometriju i narinute uvjete, te naći najprikladniji izraz kako bi se dobili što točniji rezultati. Usporedba pada tlaka daje vrlo slične rezultate, izuzev pada tlaka izračunatog preko VDI Heat Atlasa kod Shell&Tube izmjenjivača, ali kako je već naglašeno to se može objasniti korištenjem faktora otpora za hidraulički hrapavu cijev, za razliku od ostalih izraza koji u obzir uzimaju hidraulički glatku cijev. Financijskom usporedbom pločasti izmjenjivač je odabran kao optimalni, a razlog tome su manji investicijski i pogonski troškovi za očekivani vijek trajanja.

LITERATURA

- [1] Tables and Diagrams for the Refrigeration Industry: Thermophysical properties for Propane, 2001.
- [2] http://www.peacesoftware.de/einigewerte/wasser_dampf_e.html
- [3] John. R. Thome: Fundamentals of Condensation on Tubes and Tube Bundles, Chapter 7 (in Databook III)
- [4] S. M. Ghiaasiaan: Two-Phase Flow, Boiling, and Condensation in Conventional and Miniature Systems, Cambridge University Press, 2008.
- [5] J. R. Thome: Condensation inside of Horizontal Tubes, Chapter 8 (in Databook III)
- [6] R. Santa: The Analysis of Two-Phase Condensation Heat Transfer Models Based on the Comparison of the Boundary Condition, Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 9, No. 6, 2012.
- [7] S. Kakac, H. Liu, A. Pramuanjaroenkit; Heat Exchangers: Selection, Rating and Thermal Design: Third Edition, 2012.
- [8] VDI Heat Atlas, Second Edition, Springer, 2010.
- [9] Mathematical Modelling in Civil Engineering: Comparison of Two-Phase Pressure Drop Models for Condensing Flows in Horizontal Tubes, Vol. 20, No. 4, 2014.
- [10] R. Santa: Pressure Drop During Condensation of Refrigerant R-134a Inside Horizontal Tubes, Express, 2011.
- [11] M. M. Awad: Two-Phase Flow; Chapter 11, 2012.
- [12] Brass technical data sheet-RLSA, EN NORM 1652, Cu-Zn-37
- [13] B. Kraut: Strojarski priručnik, Kratis, Zagreb, 1997.
- [14] Mathcad-Termodinamički i hidraulički proračun izmjenjivača s pregradama, FSB, Termolab, Gradnja aparata
- [15] M. M. Puček: Proračun pada tlaka kod Shell&Tube izmjenjivača, FSB, Termolab, Gradnja aparata
- [16] S. Švaić: Ventili sigurnosti, FSB, Gradnja aparata
- [17] RM Alkon Stahl: Prirubnice po EDIN 2633 PN 16
- [18] <https://www.alfalaval.co.uk/products/fluid-handling/valves/safety-valves/safety-valve/>
- [19] M.E2.250.
- [20] M.E2.253.
- [21] M.E2.256.
- [22] IPIM: Tehnički priručnik za procesnu industriju
- [23] M.E2.252.

-
- [24] M.E2.257.
- [25] M.E2.258.
- [26] M.E2.259.
- [27] Pravilnik o tlačnoj opremi-IT, FSB, Gradnja aparata
- [28] A. Gebremariam: Gasketed Plate Type Heat Exchanger Design Software, Turku University of Applied Science, 2012.
- [29] D. Dović, B. Palm, S. Švaić: Generalized correlations for predicting heat transfer and pressure drop in plate heat exchanger channels of arbitrary geometry, 2009.
- [30] J. R. Garcia-Cascales, F. Vera-Garcia, J. M Corberen-Salvador, J. Gonzalez-Macia: Assessment of boiling and condensation heat transfer correlations in the modelling of plate heat exchangers, *International Journal of Refrigeration* 30, 2007.
- [31] J. H. Thome, J. Kim: *Encyclopedia of Two-Phase Heat transfer and Flow II: Special Topics and Applications*, 2015.
- [32] R. Eldeeb, V. Aute, R. Radermacher: A survey of correlations for heat transfer and pressure drop for evaporation and condensation in plate heat exchangers, *International Journal of Refrigeration*, 2016.
- [33] V. Solotych; *Two-Phase Heat Transfer Mechanism within Plate Heat Exchangers : Experiments and Modeling*, 2015.
- [34] <http://www.mhhe.com/engcs/chemical/peters/data/>
- [35] M. S. Peters, D. Timmerhaus, R. E. West: *Plant Design and Economics for Chemical Engineers: 5th Edition*, 1991.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

Usporedba izmjene topline za Shell&Tube izmjenjivač-3.3.3.1. Akers et al. (1959)									
Sadržaj pare	Ekvivalentna masena brzina	Ekvivalentni Reynoldsov broj	Faktor za množenje	Faktor za potenciranje	Koeficijent prijelaza topline	Koeficijent prolaza topline	Maseni tok kondenzata	Koeficijent prolaza između dviju koordinata sadržaja pare	Potrebna površina
x [kg/kg]	G _{ekv} [kg/m ² s]	Re _{ekv} [-]	C	n	α _{AK} [W/m2k]	k [W/m2k]	q _{m,i} [kg/s]	\bar{k} [W/m2k]	ΔA[m ²]
0,01	18,58	6755,95	5,03	0,33	383,33	345,01	0,0117	350,13	0,01112
0,02	20,48	7449,34	5,03	0,33	396,02	355,26	0,0115	360,04	0,01081
0,03	22,39	8142,73	5,03	0,33	407,94	364,82	0,0114	369,31	0,01054
0,04	24,30	8836,13	5,03	0,33	419,21	373,81	0,0113	378,04	0,01030
0,05	26,20	9529,52	5,03	0,33	429,90	382,28	0,0112	386,30	0,01008
0,06	28,11	10222,91	5,03	0,33	440,08	390,31	0,0111	394,13	0,00988
0,07	30,02	10916,31	5,03	0,33	449,82	397,95	0,0110	401,59	0,00969
0,08	31,92	11609,70	5,03	0,33	459,15	405,24	0,0108	408,72	0,00953
0,09	33,83	12303,10	5,03	0,33	468,11	412,20	0,0107	415,54	0,00937
0,10	35,74	12996,49	5,03	0,33	476,75	418,88	0,0106	422,09	0,00922
0,11	37,64	13689,88	5,03	0,33	485,08	425,30	0,0105	428,39	0,00909
0,12	39,55	14383,28	5,03	0,33	493,13	431,48	0,0104	434,46	0,00896
0,13	41,46	15076,67	5,03	0,33	500,93	437,44	0,0103	440,32	0,00884
0,14	43,36	15770,06	5,03	0,33	508,50	443,20	0,0101	445,98	0,00873
0,15	45,27	16463,46	5,03	0,33	515,84	448,77	0,0100	451,47	0,00862
0,16	47,18	17156,85	5,03	0,33	522,99	454,17	0,0099	456,78	0,00852
0,17	49,08	17850,24	5,03	0,33	529,94	459,40	0,0098	461,94	0,00843
0,18	50,99	18543,64	5,03	0,33	536,71	464,48	0,0097	466,95	0,00834
0,19	52,90	19237,03	5,03	0,33	543,32	469,42	0,0095	471,83	0,00825
0,20	54,80	19930,42	5,03	0,33	549,77	474,23	0,0094	476,57	0,00817
0,21	56,71	20623,82	5,03	0,33	556,08	478,91	0,0093	481,20	0,00809
0,22	58,62	21317,21	5,03	0,33	562,24	483,48	0,0092	485,70	0,00802
0,23	60,52	22010,60	5,03	0,33	568,27	487,93	0,0091	490,10	0,00794
0,24	62,43	22704,00	5,03	0,33	574,18	492,28	0,0090	494,40	0,00787
0,25	64,34	23397,39	5,03	0,33	579,96	496,53	0,0088	498,60	0,00781
0,26	66,24	24090,79	5,03	0,33	585,64	500,68	0,0087	502,71	0,00774
0,27	68,15	24784,18	5,03	0,33	591,20	504,74	0,0086	506,73	0,00768
0,28	70,05	25477,57	5,03	0,33	596,66	508,72	0,0085	510,66	0,00762
0,29	71,96	26170,97	5,03	0,33	602,03	512,61	0,0084	514,52	0,00757
0,30	73,87	26864,36	5,03	0,33	607,30	516,43	0,0082	518,30	0,00751
0,31	75,77	27557,75	5,03	0,33	612,48	520,17	0,0081	522,00	0,00746
0,32	77,68	28251,15	5,03	0,33	617,58	523,84	0,0080	525,64	0,00741
0,33	79,59	28944,54	5,03	0,33	622,59	527,44	0,0079	529,21	0,00736
0,34	81,49	29637,93	5,03	0,33	627,52	530,98	0,0078	532,71	0,00731
0,35	83,40	30331,33	5,03	0,33	632,38	534,45	0,0077	536,15	0,00726
0,36	85,31	31024,72	5,03	0,33	637,16	537,86	0,0075	539,54	0,00722
0,37	87,21	31718,11	5,03	0,33	641,87	541,21	0,0074	542,86	0,00717
0,38	89,12	32411,51	5,03	0,33	646,51	544,51	0,0073	546,13	0,00713
0,39	91,03	33104,90	5,03	0,33	651,09	547,76	0,0072	549,35	0,00709
0,40	92,93	33798,30	5,03	0,33	655,61	550,95	0,0071	552,52	0,00705
0,41	94,84	34491,69	5,03	0,33	660,06	554,09	0,0070	555,64	0,00701
0,42	96,75	35185,08	5,03	0,33	664,45	557,18	0,0068	558,71	0,00697
0,43	98,65	35878,48	5,03	0,33	668,79	560,23	0,0067	561,73	0,00693
0,44	100,56	36571,87	5,03	0,33	673,07	563,23	0,0066	564,71	0,00689
0,45	102,47	37265,26	5,03	0,33	677,30	566,19	0,0065	567,64	0,00686
0,46	104,37	37958,66	5,03	0,33	681,47	569,10	0,0064	570,54	0,00682
0,47	106,28	38652,05	5,03	0,33	685,60	571,97	0,0062	573,39	0,00679
0,48	108,19	39345,44	5,03	0,33	689,67	574,81	0,0061	576,21	0,00676
0,49	110,09	40038,84	5,03	0,33	693,70	577,60	0,0060	578,98	0,00672
0,50	112,00	40732,23	5,03	0,33	697,68	580,36	0,0059	581,72	0,00669
0,51	113,91	41425,62	5,03	0,33	701,62	583,08	0,0058	584,43	0,00666
0,52	115,81	42119,02	5,03	0,33	705,51	585,77	0,0057	587,09	0,00663
0,53	117,72	42812,41	5,03	0,33	709,36	588,42	0,0055	589,73	0,00660
0,54	119,63	43505,81	5,03	0,33	713,17	591,04	0,0054	592,33	0,00657
0,55	121,53	44199,20	5,03	0,33	716,94	593,63	0,0053	594,90	0,00654
0,56	123,44	44892,59	5,03	0,33	720,67	596,18	0,0052	597,44	0,00652
0,57	125,35	45585,99	5,03	0,33	724,36	598,70	0,0051	599,95	0,00649
0,58	127,25	46279,38	5,03	0,33	728,01	601,20	0,0049	602,43	0,00646
0,59	129,16	46972,77	5,03	0,33	731,63	603,66	0,0048	604,88	0,00644
0,60	131,07	47666,17	5,03	0,33	735,22	606,10	0,0047	607,30	0,00641
0,61	132,97	48359,56	5,03	0,33	738,76	608,51	0,0046	609,70	0,00639
0,62	134,88	49052,95	5,03	0,33	742,28	610,89	0,0045	612,07	0,00636
0,63	136,79	49746,35	5,03	0,33	745,76	613,25	0,0044	614,43	0,00633
0,64	138,69	50439,74	0,0265	0,8	617,88	524,06	0,0042	526,50	0,00739
0,65	140,60	51133,13	0,0265	0,8	624,67	528,94	0,0041	531,36	0,00733
0,66	142,51	51826,53	0,0265	0,8	631,44	533,78	0,0040	536,19	0,00726
0,67	144,41	52519,92	0,0265	0,8	638,19	538,59	0,0039	540,99	0,00720
0,68	146,32	53213,32	0,0265	0,8	644,92	543,38	0,0038	545,76	0,00713
0,69	148,23	53906,71	0,0265	0,8	651,63	548,14	0,0037	550,51	0,00707
0,70	150,13	54600,10	0,0265	0,8	658,33	552,87	0,0035	555,22	0,00701
0,71	152,04	55293,50	0,0265	0,8	665,01	557,57	0,0034	559,91	0,00695
0,72	153,95	55986,89	0,0265	0,8	671,67	562,25	0,0033	564,58	0,00690
0,73	155,85	56680,28	0,0265	0,8	678,32	566,90	0,0032	569,21	0,00684
0,74	157,76	57373,68	0,0265	0,8	684,95	571,52	0,0031	573,82	0,00678
0,75	159,67	58067,07	0,0265	0,8	691,56	576,12	0,0029	578,41	0,00673
0,76	161,57	58760,46	0,0265	0,8	698,16	580,69	0,0028	582,97	0,00668
0,77	163,48	59453,86	0,0265	0,8	704,75	585,24	0,0027	587,50	0,00663
0,78	165,38	60147,25	0,0265	0,8	711,31	589,76	0,0026	592,01	0,00658
0,79	167,29	60840,64	0,0265	0,8	717,87	594,26	0,0025	596,50	0,00653
0,80	169,20	61534,04	0,0265	0,8	724,40	598,73	0,0024	600,96	0,00648
0,81	171,10	62227,43	0,0265	0,8	730,93	603,18	0,0022	605,40	0,00643
0,82	173,01	62920,82	0,0265	0,8	737,44	607,61	0,0021	609,81	0,00638
0,83	174,92	63614,22	0,0265	0,8	743,93	612,01	0,0020	614,20	0,00634
0,84	176,82	64307,61	0,0265	0,8	750,41	616,39	0,0019	618,57	0,00629
0,85	178,73	65001,01	0,0265	0,8	756,88	620,75	0,0018	622,91	0,00625
0,86	180,64	65694,40	0,0265	0,8	763,33	625,08	0,0016	627,23	0,00621
0,87	182,54	66387,79	0,0265	0,8	769,77	629,39	0,0015	631,53	0,00616
0,88	184,45	67081,19	0,0265	0,8	776,19	633,68	0,0014	635,81	0,00612
0,89	186,36	67774,58	0,0265	0,8	782,60	637,95	0,0013	640,07	0,00608
0,90	188,26	68467,97	0,0265	0,8	789,00	642,19	0,0012	644,30	0,00604
0,91	190,17	69161,37	0,0265	0,8	795,39	646,42	0,0011	648,52	0,00600
0,92	192,08	69854,76	0,0265	0,8	801,76	650,62	0,0009	652,71	0,00596
0,93	193,98	70548,15	0,0265	0,8	808,12	654,80	0,0008	656,88	0,00593
0,94	195,89	71241,55	0,0265	0,8	814,47	658,96	0,0007	661,03	0,00589
0,95	197,80	71934,94	0,0265	0,8	820,81	663,10	0,0006	665,16	0,00585
0,96	199,70	72628,33	0,0265	0,8	827,13	667,22	0,0005	669,27	0,00582
0,97	201,61	73321,73	0,0265	0,8	833,44	671,33	0,0004	673,37	0,00578
0,98	203,52	74015,12	0,0265	0,8	839,74	675,41	0,0002	677,44	0,00575
0,99	205,42	74708,52	0,0265	0,8	846,03	679,47	0,0001	Ukupna potrebna površina A[m ²]	0,71694

Uspredba izmjene topline za Shell&Tube izmjenjivač-3.3.3.2. Cavallini-Zecchin (1971)								
Sadržaj pare	Reynoldsov broj za kapljevinu	Reynoldsov broj za paru	Ekvivalentni Reynoldsov broj	Koeficijent prijelaza topline	Koeficijent prolaza topline	Maseni tok kondenzata	Koeficijent prolaza topline između dviju koordinata sadržaja pare	Potrebna površina
x [kg/kg]	Re _l [-]	Re _v [-]	Re _{ekv,CZ} [-]	α _{CZ} [W/m2k]	k [W/m2k]	q _l	\bar{k} [W/m2k]	ΔA[m ²]
0,01	6001,93	530,89	6755,95	233,43	218,64	0,0117	226,93	0,01716
0,02	5941,30	1061,78	7449,34	252,41	235,21	0,0115	243,26	0,01600
0,03	5880,68	1592,68	8142,73	271,04	251,30	0,0114	259,13	0,01502
0,04	5820,05	2123,57	8836,13	289,35	266,97	0,0113	274,60	0,01418
0,05	5759,43	2654,46	9529,52	307,38	282,24	0,0112	289,69	0,01344
0,06	5698,80	3185,35	10222,91	325,14	297,15	0,0111	304,43	0,01279
0,07	5638,17	3716,24	10916,31	342,67	311,72	0,0110	318,85	0,01221
0,08	5577,55	4247,13	11609,70	359,97	325,97	0,0108	332,95	0,01169
0,09	5516,92	4778,03	12303,10	377,07	339,93	0,0107	346,77	0,01123
0,10	5456,30	5308,92	12996,49	393,98	353,61	0,0106	360,32	0,01080
0,11	5395,67	5839,81	13689,88	410,71	367,03	0,0105	373,61	0,01042
0,12	5335,05	6370,70	14383,28	427,27	380,20	0,0104	386,66	0,01007
0,13	5274,42	6901,59	15076,67	443,67	393,13	0,0103	399,48	0,00975
0,14	5213,80	7432,48	15770,06	459,92	405,84	0,0101	412,08	0,00945
0,15	5153,17	7963,38	16463,46	476,03	418,33	0,0100	424,47	0,00917
0,16	5092,54	8494,27	17156,85	492,00	430,61	0,0099	436,66	0,00892
0,17	5031,92	9025,16	17850,24	507,84	442,70	0,0098	448,65	0,00868
0,18	4971,29	9556,05	18543,64	523,56	454,60	0,0097	460,46	0,00845
0,19	4910,67	10086,94	19237,03	539,17	466,32	0,0095	472,09	0,00825
0,20	4850,04	10617,83	19930,42	554,66	477,86	0,0094	483,55	0,00805
0,21	4789,42	11148,73	20623,82	570,04	489,24	0,0093	494,84	0,00787
0,22	4728,79	11679,62	21317,21	585,33	500,45	0,0092	505,98	0,00769
0,23	4668,17	12210,51	22010,60	600,51	511,51	0,0091	516,96	0,00753
0,24	4607,54	12741,40	22704,00	615,59	522,41	0,0090	527,79	0,00738
0,25	4546,91	13272,29	23397,39	630,59	533,17	0,0088	538,48	0,00723
0,26	4486,29	13803,18	24090,79	645,50	543,79	0,0087	549,03	0,00709
0,27	4425,66	14334,08	24784,18	660,32	554,27	0,0086	559,45	0,00696
0,28	4365,04	14864,97	25477,57	675,06	564,62	0,0085	569,73	0,00683
0,29	4304,41	15395,86	26170,97	689,71	574,84	0,0084	579,88	0,00671
0,30	4243,79	15926,75	26864,36	704,29	584,93	0,0082	589,91	0,00660
0,31	4183,16	16457,64	27557,75	718,80	594,90	0,0081	599,83	0,00649
0,32	4122,54	16988,54	28251,15	733,23	604,75	0,0080	609,62	0,00639
0,33	4061,91	17519,43	28944,54	747,59	614,49	0,0079	619,30	0,00629
0,34	4001,29	18050,32	29637,93	761,89	624,11	0,0078	628,87	0,00619
0,35	3940,66	18581,21	30331,33	776,12	633,63	0,0077	638,33	0,00610
0,36	3880,03	19112,10	31024,72	790,28	643,03	0,0075	647,69	0,00601
0,37	3819,41	19642,99	31718,11	804,38	652,34	0,0074	656,94	0,00593
0,38	3758,78	20173,89	32411,51	818,41	661,54	0,0073	666,09	0,00584
0,39	3698,16	20704,78	33104,90	832,39	670,64	0,0072	675,15	0,00577
0,40	3637,53	21235,67	33798,30	846,31	679,65	0,0071	684,10	0,00569
0,41	3576,91	21766,56	34491,69	860,17	688,56	0,0070	692,97	0,00562
0,42	3516,28	22297,45	35185,08	873,98	697,38	0,0068	701,74	0,00555
0,43	3455,66	22828,34	35878,48	887,73	706,11	0,0067	710,43	0,00548
0,44	3395,03	23359,24	36571,87	901,43	714,75	0,0066	719,02	0,00541
0,45	3334,40	23890,13	37265,26	915,07	723,30	0,0065	727,53	0,00535
0,46	3273,78	24421,02	37958,66	928,67	731,77	0,0064	735,96	0,00529
0,47	3213,15	24951,91	38652,05	942,22	740,15	0,0062	744,30	0,00523
0,48	3152,53	25482,80	39345,44	955,72	748,46	0,0061	752,57	0,00517
0,49	3091,90	26013,69	40038,84	969,17	756,68	0,0060	760,75	0,00512
0,50	3031,28	26544,59	40732,23	982,57	764,83	0,0059	768,86	0,00506
0,51	2970,65	27075,48	41425,62	995,93	772,90	0,0058	776,89	0,00501
0,52	2910,03	27606,37	42119,02	1009,24	780,89	0,0057	784,85	0,00496
0,53	2849,40	28137,26	42812,41	1022,51	788,81	0,0055	792,74	0,00491
0,54	2788,77	28668,15	43505,81	1035,74	796,66	0,0054	800,55	0,00486
0,55	2728,15	29199,04	44199,20	1048,93	804,44	0,0053	808,29	0,00482
0,56	2667,52	29729,94	44892,59	1062,07	812,15	0,0052	815,97	0,00477
0,57	2606,90	30260,83	45585,99	1075,17	819,79	0,0051	823,57	0,00473
0,58	2546,27	30791,72	46279,38	1088,24	827,36	0,0049	831,11	0,00468
0,59	2485,65	31322,61	46972,77	1101,26	834,87	0,0048	838,59	0,00464
0,60	2425,02	31853,50	47666,17	1114,25	842,31	0,0047	846,00	0,00460
0,61	2364,40	32384,39	48359,56	1127,19	849,69	0,0046	853,34	0,00456
0,62	2303,77	32915,29	49052,95	1140,11	857,00	0,0045	860,63	0,00452
0,63	2243,14	33446,18	49746,35	1152,98	864,26	0,0044	867,85	0,00449
0,64	2182,52	33977,07	50439,74	1165,82	871,45	0,0042	875,02	0,00445
0,65	2121,89	34507,96	51133,13	1178,62	878,58	0,0041	882,12	0,00441
0,66	2061,27	35038,85	51826,53	1191,39	885,66	0,0040	889,17	0,00438
0,67	2000,64	35569,75	52519,92	1204,13	892,68	0,0039	896,16	0,00434
0,68	1940,02	36100,64	53213,32	1216,83	899,64	0,0038	903,09	0,00431
0,69	1879,39	36631,53	53906,71	1229,50	906,55	0,0037	909,97	0,00428
0,70	1818,77	37162,42	54600,10	1242,13	913,40	0,0035	916,80	0,00425
0,71	1758,14	37693,31	55293,50	1254,74	920,19	0,0034	923,57	0,00422
0,72	1697,51	38224,20	55986,89	1267,31	926,94	0,0033	930,28	0,00418
0,73	1636,89	38755,10	56680,28	1279,85	933,63	0,0032	936,95	0,00416
0,74	1576,26	39285,99	57373,68	1292,36	940,27	0,0031	943,56	0,00413
0,75	1515,64	39816,88	58067,07	1304,84	946,86	0,0029	950,13	0,00410
0,76	1455,01	40347,77	58760,46	1317,29	953,40	0,0028	956,64	0,00407
0,77	1394,39	40878,66	59453,86	1329,71	959,89	0,0027	963,11	0,00404
0,78	1333,76	41409,55	60147,25	1342,10	966,33	0,0026	969,52	0,00402
0,79	1273,14	41940,45	60840,64	1354,47	972,72	0,0025	975,89	0,00399
0,80	1212,51	42471,34	61534,04	1366,80	979,07	0,0024	982,22	0,00396
0,81	1151,89	43002,23	62227,43	1379,11	985,36	0,0022	988,49	0,00394
0,82	1091,26	43533,12	62920,82	1391,39	991,62	0,0021	994,72	0,00391
0,83	1030,63	44064,01	63614,22	1403,64	997,83	0,0020	1000,91	0,00389
0,84	970,01	44594,90	64307,61	1415,87	1003,99	0,0019	1007,05	0,00387
0,85	909,38	45125,80	65001,01	1428,07	1010,11	0,0018	1013,15	0,00384
0,86	848,76	45656,69	65694,40	1440,24	1016,18	0,0016	1019,20	0,00382
0,87	788,13	46187,58	66387,79	1452,39	1022,22	0,0015	1025,21	0,00380
0,88	727,51	46718,47	67081,19	1464,51	1028,21	0,0014	1031,18	0,00378
0,89	666,88	47249,36	67774,58	1476,61	1034,16	0,0013	1037,11	0,00375
0,90	606,26	47780,25	68467,97	1488,69	1040,06	0,0012	1043,00	0,00373
0,91	545,63	48311,15	69161,37	1500,73	1045,93	0,0011	1048,84	0,00371
0,92	485,00	48842,04	69854,76	1512,76	1051,76	0,0009	1054,65	0,00369
0,93	424,38	49372,93	70548,15	1524,76	1057,54	0,0008	1060,42	0,00367
0,94	363,75	49903,82	71241,55	1536,74	1063,29	0,0007	1066,15	0,00365
0,95	303,13	50434,71	71934,94	1548,69	1069,00	0,0006	1071,84	0,00363
0,96	242,50	50965,61	72628,33	1560,62	1074,67	0,0005	1077,49	0,00361
0,97	181,88	51496,50	73321,73	1572,53	1080,31	0,0004	1083,10	0,00359
0,98	121,25	52027,39	74015,12	1584,42	1085,90	0,0002	1088,68	0,00358
0,99	60,63	52558,28	74708,52	1596,28	1091,46	0,0001	Ukupna potrebna površina A[m ²]	0,61191

Usporedba izmjene topline za Shell&Tube izmjenjivač-3.3.3.3. Traviss et al. (1973)

Sadržaj pare	Reynoldsov broj za kapljevinu	Martinellijev parametar	Parametar	Parametar	Ukupni koeficijent prijelaza topline	Koeficijent prolaza topline	Maseni tok kondenzata	Koeficijent prolaza topline između dviju koordinata sadržaja pare	Potrebna površina
x [kg/kg]	Re _f [-]	X _{tt} [-]	F ₁	F ₂	α _{TR} [W/m2k]	k [W/m2k]	q _{m,i} [kg/s]	\bar{k} [W/m2k]	ΔA[m ²]
0,01	6001,93	6,2457	0,20	30,98	133,18	128,24	0,0117	152,73	0,02549
0,02	5941,30	3,3165	0,29	30,96	186,81	177,22	0,0115	195,93	0,01987
0,03	5880,68	2,2814	0,35	30,94	228,88	214,65	0,0114	230,39	0,01690
0,04	5820,05	1,7446	0,41	30,92	265,03	246,13	0,0113	259,97	0,01498
0,05	5759,43	1,4138	0,47	30,90	297,41	273,81	0,0112	286,30	0,01360
0,06	5698,80	1,1885	0,52	30,88	327,09	298,78	0,0111	310,23	0,01255
0,07	5638,17	1,0246	0,57	30,86	354,74	321,67	0,0110	332,30	0,01172
0,08	5577,55	0,8998	0,62	30,83	380,76	342,92	0,0108	352,87	0,01103
0,09	5516,92	0,8014	0,66	30,81	405,44	362,82	0,0107	372,19	0,01046
0,10	5456,30	0,7216	0,71	30,79	429,00	381,57	0,0106	390,45	0,00997
0,11	5395,67	0,6557	0,75	30,77	451,59	399,34	0,0105	407,79	0,00955
0,12	5335,05	0,6002	0,80	30,74	473,34	416,25	0,0104	424,33	0,00917
0,13	5274,42	0,5527	0,84	30,72	494,34	432,41	0,0103	440,15	0,00885
0,14	5213,80	0,5117	0,88	30,70	514,68	447,89	0,0101	455,33	0,00855
0,15	5153,17	0,4759	0,92	30,67	534,42	462,76	0,0100	469,92	0,00828
0,16	5092,54	0,4443	0,97	30,65	553,61	477,08	0,0099	483,99	0,00804
0,17	5031,92	0,4162	1,01	30,62	572,31	490,90	0,0098	497,58	0,00782
0,18	4971,29	0,3910	1,05	30,60	590,54	504,26	0,0097	510,72	0,00762
0,19	4910,67	0,3684	1,09	30,57	608,35	517,19	0,0095	523,45	0,00744
0,20	4850,04	0,3478	1,14	30,55	625,76	529,72	0,0094	535,80	0,00727
0,21	4789,42	0,3291	1,18	30,52	642,81	541,88	0,0093	547,79	0,00711
0,22	4728,79	0,3120	1,22	30,50	659,50	553,70	0,0092	559,45	0,00696
0,23	4668,17	0,2963	1,27	30,47	675,88	565,19	0,0091	570,79	0,00682
0,24	4607,54	0,2819	1,31	30,45	691,94	576,38	0,0090	581,83	0,00669
0,25	4546,91	0,2685	1,36	30,42	707,71	587,28	0,0088	592,60	0,00657
0,26	4486,29	0,2561	1,40	30,39	723,20	597,91	0,0087	603,10	0,00646
0,27	4425,66	0,2445	1,45	30,36	738,43	608,28	0,0086	613,35	0,00635
0,28	4365,04	0,2337	1,50	30,34	753,41	618,41	0,0085	623,36	0,00625
0,29	4304,41	0,2236	1,54	30,31	768,14	628,30	0,0084	633,14	0,00615
0,30	4243,79	0,2141	1,59	30,28	782,65	637,98	0,0082	642,70	0,00606
0,31	4183,16	0,2052	1,64	30,25	796,93	647,43	0,0081	652,06	0,00597
0,32	4122,54	0,1968	1,69	30,22	811,00	656,69	0,0080	661,22	0,00589
0,33	4061,91	0,1889	1,74	30,19	824,86	665,75	0,0079	670,19	0,00581
0,34	4001,29	0,1815	1,79	30,16	838,53	674,62	0,0078	678,97	0,00573
0,35	3940,66	0,1744	1,84	30,13	852,00	683,32	0,0077	687,58	0,00566
0,36	3880,03	0,1676	1,90	30,10	865,29	691,84	0,0075	696,01	0,00559
0,37	3819,41	0,1613	1,95	30,06	878,39	700,19	0,0074	704,28	0,00553
0,38	3758,78	0,1552	2,00	30,03	891,32	708,38	0,0073	712,40	0,00546
0,39	3698,16	0,1494	2,06	30,00	904,08	716,42	0,0072	720,36	0,00540
0,40	3637,53	0,1439	2,12	29,97	916,68	724,30	0,0071	728,17	0,00535
0,41	3576,91	0,1386	2,18	29,93	929,11	732,04	0,0070	735,84	0,00529
0,42	3516,28	0,1336	2,24	29,90	941,39	739,64	0,0068	743,37	0,00524
0,43	3455,66	0,1287	2,30	29,86	953,51	747,10	0,0067	750,77	0,00519
0,44	3395,03	0,1241	2,36	29,83	965,48	754,43	0,0066	758,03	0,00514
0,45	3334,40	0,1197	2,43	29,79	977,30	761,63	0,0065	765,17	0,00509
0,46	3273,78	0,1154	2,49	29,75	988,98	768,70	0,0064	772,18	0,00504
0,47	3213,15	0,1113	2,56	29,71	1000,51	775,65	0,0062	779,07	0,00500
0,48	3152,53	0,1073	2,63	29,68	1011,91	782,49	0,0061	785,84	0,00495
0,49	3091,90	0,1035	2,71	29,64	1023,17	789,20	0,0060	792,50	0,00491
0,50	3031,28	0,0999	2,78	29,60	1034,29	795,80	0,0059	799,05	0,00487
0,51	2970,65	0,0964	2,86	29,55	1045,29	802,30	0,0058	805,49	0,00483
0,52	2910,03	0,0929	2,94	29,51	1056,15	808,68	0,0057	811,82	0,00480
0,53	2849,40	0,0896	3,02	29,47	1066,88	814,96	0,0055	818,04	0,00476
0,54	2788,77	0,0865	3,11	29,43	1077,49	821,13	0,0054	824,17	0,00472
0,55	2728,15	0,0834	3,19	29,38	1087,97	827,21	0,0053	830,19	0,00469
0,56	2667,52	0,0804	3,28	29,34	1098,33	833,18	0,0052	836,12	0,00466
0,57	2606,90	0,0775	3,38	29,29	1108,56	839,06	0,0051	841,95	0,00462
0,58	2546,27	0,0747	3,48	29,24	1118,68	844,84	0,0049	847,68	0,00459
0,59	2485,65	0,0720	3,58	29,19	1128,68	850,53	0,0048	853,33	0,00456
0,60	2425,02	0,0693	3,69	29,14	1138,55	856,12	0,0047	858,88	0,00453
0,61	2364,40	0,0668	3,80	29,09	1148,31	861,63	0,0046	864,34	0,00450
0,62	2303,77	0,0643	3,91	29,04	1157,96	867,05	0,0045	869,71	0,00448
0,63	2243,14	0,0619	4,03	28,98	1167,48	872,38	0,0044	875,00	0,00445
0,64	2182,52	0,0595	4,16	28,93	1176,90	877,63	0,0042	880,21	0,00442
0,65	2121,89	0,0572	4,29	28,87	1186,20	882,79	0,0041	885,33	0,00440
0,66	2061,27	0,0550	4,43	28,81	1195,38	887,86	0,0040	890,36	0,00437
0,67	2000,64	0,0528	4,57	28,75	1204,46	892,86	0,0039	895,32	0,00435
0,68	1940,02	0,0507	4,73	28,69	1213,42	897,78	0,0038	900,20	0,00432
0,69	1879,39	0,0486	4,89	28,63	1222,28	902,62	0,0037	905,00	0,00430
0,70	1818,77	0,0466	5,06	28,56	1231,02	907,38	0,0035	909,72	0,00428
0,71	1758,14	0,0446	5,24	28,49	1239,66	912,06	0,0034	914,36	0,00426
0,72	1697,51	0,0427	5,43	28,42	1248,19	916,67	0,0033	918,93	0,00424
0,73	1636,89	0,0408	5,64	28,34	1256,61	921,20	0,0032	923,43	0,00422
0,74	1576,26	0,0390	5,85	28,27	1264,93	925,66	0,0031	927,86	0,00420
0,75	1515,64	0,0372	6,09	28,19	1273,14	930,05	0,0029	932,22	0,00418
0,76	1455,01	0,0354	6,33	28,11	1281,25	934,38	0,0028	936,50	0,00416
0,77	1394,39	0,0337	6,60	28,02	1289,26	938,63	0,0027	940,72	0,00414
0,78	1333,76	0,0320	6,89	27,93	1297,18	942,82	0,0026	944,88	0,00412
0,79	1273,14	0,0303	7,21	27,83	1305,00	946,94	0,0025	948,98	0,00410
0,80	1212,51	0,0287	7,55	27,74	1312,73	951,01	0,0024	953,01	0,00409
0,81	1151,89	0,0271	7,92	27,63	1320,38	955,02	0,0022	959,09	0,00406
0,82	1091,26	0,0255	8,33	27,36	1336,00	963,16	0,0021	966,06	0,00403
0,83	1030,63	0,0240	8,78	27,17	1347,21	968,97	0,0020	971,94	0,00401
0,84	970,01	0,0225	9,28	26,96	1358,72	974,91	0,0019	977,97	0,00398
0,85	909,38	0,0210	9,85	26,75	1370,62	981,02	0,0018	984,19	0,00396
0,86	848,76	0,0195	10,48	26,52	1383,00	987,35	0,0016	990,64	0,00393
0,87	788,13	0,0181	11,20	26,27	1395,97	993,94	0,0015	997,41	0,00390
0,88	727,51	0,0166	12,03	25,99	1409,70	1000,88	0,0014	1004,58	0,00388
0,89	666,88	0,0152	12,99	25,69	1424,40	1008,27	0,0013	1012,25	0,00385
0,90	606,26	0,0138	14,13	25,36	1440,36	1016,24	0,0012	1020,62	0,00381
0,91	545,63	0,0125	15,50	24,99	1458,00	1024,99	0,0011	1029,90	0,00378
0,92	485,00	0,0111	17,17	24,57	1477,93	1034,80	0,0009	1040,46	0,00374
0,93	424,38	0,0097	19,28	24,09	1501,10	1046,11	0,0008	1052,86	0,00370
0,94	363,75	0,0084	22,03	23,52	1529,05	1059,61	0,0007	1068,06	0,00365
0,95	303,13	0,0071	25,77	22,82	1564,50	1076,51	0,0006	1087,84	0,00358
0,96	242,50	0,0057	31,22	21,94	1612,83	1099,17	0,0005	1116,06	0,00349
0,97	181,88	0,0044	39,97	20,73	1686,62	1132,95	0,0004	1163,49	0,00335
0,98	121,25	0,0030	56,64	18,84	1825,63	1194,03	0,0002	1286,63	0,00303
0,99	60,63	0,0016	103,06	14,60	2297,29	1379,23	0,0001	Ukupna potrebna površina A[m ²]	0,60172

Usporedba izmjene topline za Shell&Tube izmjenjivač-3.3.3.4.Shah (1979)							
Sadržaj pare	Reynoldsov broj za kapljevину	Koeficijent prijelaza topline za kapljevину	Koeficijent prijelaza topline	Koeficijent prolaza topline	Maseni tok kondenzata	Koeficijent prolaza topline između dviju koordinata sadržaja pare	Potrebna površina
x [kg/kg]	Re _f [-]	α _i [W/m ² k]	α [W/m2k]	k [W/m2k]	q _m [kg/s]	\bar{k} [W/m2k]	ΔA[m ²]
0,01	6062,55	105,91	125,11	120,73	0,0117	126,78	0,03071
0,02	6062,55	105,91	138,15	132,83	0,0115	138,08	0,02820
0,03	6062,55	105,91	149,53	143,32	0,0114	148,09	0,02629
0,04	6062,55	105,91	159,93	152,85	0,0113	157,28	0,02475
0,05	6062,55	105,91	169,67	161,72	0,0112	165,89	0,02347
0,06	6062,55	105,91	178,89	170,07	0,0111	174,04	0,02237
0,07	6062,55	105,91	187,70	178,01	0,0110	181,82	0,02141
0,08	6062,55	105,91	196,17	185,62	0,0108	189,27	0,02057
0,09	6062,55	105,91	204,35	192,93	0,0107	196,46	0,01982
0,10	6062,55	105,91	212,28	199,98	0,0106	203,40	0,01914
0,11	6062,55	105,91	220,00	206,81	0,0105	210,13	0,01853
0,12	6062,55	105,91	227,51	213,44	0,0104	216,67	0,01797
0,13	6062,55	105,91	234,85	219,89	0,0103	223,03	0,01746
0,14	6062,55	105,91	242,03	226,17	0,0101	229,23	0,01698
0,15	6062,55	105,91	249,06	232,30	0,0100	235,29	0,01655
0,16	6062,55	105,91	255,95	238,28	0,0099	241,21	0,01614
0,17	6062,55	105,91	262,72	244,13	0,0098	247,00	0,01576
0,18	6062,55	105,91	269,36	249,86	0,0097	252,67	0,01541
0,19	6062,55	105,91	275,90	255,47	0,0095	258,22	0,01508
0,20	6062,55	105,91	282,33	260,98	0,0094	263,68	0,01476
0,21	6062,55	105,91	288,66	266,38	0,0093	269,03	0,01447
0,22	6062,55	105,91	294,89	271,68	0,0092	274,28	0,01419
0,23	6062,55	105,91	301,04	276,89	0,0091	279,45	0,01393
0,24	6062,55	105,91	307,10	282,01	0,0090	284,52	0,01368
0,25	6062,55	105,91	313,08	287,04	0,0088	289,52	0,01345
0,26	6062,55	105,91	318,98	292,00	0,0087	294,43	0,01322
0,27	6062,55	105,91	324,81	296,87	0,0086	299,27	0,01301
0,28	6062,55	105,91	330,56	301,67	0,0085	304,03	0,01281
0,29	6062,55	105,91	336,25	306,40	0,0084	308,73	0,01261
0,30	6062,55	105,91	341,87	311,05	0,0082	313,35	0,01242
0,31	6062,55	105,91	347,42	315,64	0,0081	317,91	0,01225
0,32	6062,55	105,91	352,91	320,17	0,0080	322,40	0,01208
0,33	6062,55	105,91	358,33	324,63	0,0079	326,83	0,01191
0,34	6062,55	105,91	363,70	329,03	0,0078	331,19	0,01175
0,35	6062,55	105,91	369,01	333,36	0,0077	335,50	0,01160
0,36	6062,55	105,91	374,26	337,64	0,0075	339,75	0,01146
0,37	6062,55	105,91	379,45	341,87	0,0074	343,95	0,01132
0,38	6062,55	105,91	384,59	346,03	0,0073	348,09	0,01118
0,39	6062,55	105,91	389,68	350,14	0,0072	352,17	0,01105
0,40	6062,55	105,91	394,71	354,20	0,0071	356,21	0,01093
0,41	6062,55	105,91	399,69	358,21	0,0070	360,19	0,01081
0,42	6062,55	105,91	404,62	362,17	0,0068	364,12	0,01069
0,43	6062,55	105,91	409,51	366,07	0,0067	368,00	0,01058
0,44	6062,55	105,91	414,34	369,93	0,0066	371,83	0,01047
0,45	6062,55	105,91	419,12	373,73	0,0065	375,61	0,01036
0,46	6062,55	105,91	423,85	377,49	0,0064	379,35	0,01026
0,47	6062,55	105,91	428,54	381,20	0,0062	383,04	0,01016
0,48	6062,55	105,91	433,18	384,87	0,0061	386,68	0,01007
0,49	6062,55	105,91	437,77	388,49	0,0060	390,28	0,00998
0,50	6062,55	105,91	442,31	392,06	0,0059	393,83	0,00989
0,51	6062,55	105,91	446,81	395,59	0,0058	397,34	0,00980
0,52	6062,55	105,91	451,26	399,08	0,0057	400,80	0,00971
0,53	6062,55	105,91	455,66	402,52	0,0055	404,22	0,00963
0,54	6062,55	105,91	460,02	405,91	0,0054	407,59	0,00955
0,55	6062,55	105,91	464,33	409,27	0,0053	410,92	0,00947
0,56	6062,55	105,91	468,59	412,57	0,0052	414,21	0,00940
0,57	6062,55	105,91	472,81	415,84	0,0051	417,45	0,00933
0,58	6062,55	105,91	476,98	419,06	0,0049	420,65	0,00926
0,59	6062,55	105,91	481,10	422,24	0,0048	423,81	0,00919
0,60	6062,55	105,91	485,17	425,37	0,0047	426,92	0,00912
0,61	6062,55	105,91	489,19	428,46	0,0046	429,99	0,00905
0,62	6062,55	105,91	493,17	431,51	0,0045	433,01	0,00899
0,63	6062,55	105,91	497,10	434,51	0,0044	435,99	0,00893
0,64	6062,55	105,91	500,97	437,47	0,0042	438,93	0,00887
0,65	6062,55	105,91	504,79	440,38	0,0041	441,82	0,00881
0,66	6062,55	105,91	508,57	443,25	0,0040	444,66	0,00876
0,67	6062,55	105,91	512,28	446,07	0,0039	447,46	0,00870
0,68	6062,55	105,91	515,95	448,85	0,0038	450,21	0,00865
0,69	6062,55	105,91	519,55	451,57	0,0037	452,91	0,00860
0,70	6062,55	105,91	523,10	454,25	0,0035	455,57	0,00855
0,71	6062,55	105,91	526,59	456,88	0,0034	458,17	0,00850
0,72	6062,55	105,91	530,02	459,46	0,0033	460,72	0,00845
0,73	6062,55	105,91	533,38	461,98	0,0032	463,22	0,00840
0,74	6062,55	105,91	536,68	464,45	0,0031	465,66	0,00836
0,75	6062,55	105,91	539,90	466,87	0,0029	468,05	0,00832
0,76	6062,55	105,91	543,06	469,23	0,0028	470,37	0,00828
0,77	6062,55	105,91	546,14	471,52	0,0027	472,64	0,00824
0,78	6062,55	105,91	549,13	473,75	0,0026	474,84	0,00820
0,79	6062,55	105,91	552,04	475,92	0,0025	476,97	0,00816
0,80	6062,55	105,91	554,87	478,02	0,0024	479,03	0,00813
0,81	6062,55	105,91	557,59	480,04	0,0022	481,01	0,00809
0,82	6062,55	105,91	560,21	481,98	0,0021	482,90	0,00806
0,83	6062,55	105,91	562,71	483,83	0,0020	484,71	0,00803
0,84	6062,55	105,91	565,10	485,59	0,0019	486,42	0,00800
0,85	6062,55	105,91	567,35	487,25	0,0018	488,02	0,00798
0,86	6062,55	105,91	569,44	488,80	0,0016	489,51	0,00795
0,87	6062,55	105,91	571,38	490,22	0,0015	490,86	0,00793
0,88	6062,55	105,91	573,12	491,50	0,0014	492,06	0,00791
0,89	6062,55	105,91	574,65	492,63	0,0013	493,10	0,00790
0,90	6062,55	105,91	575,93	493,57	0,0012	493,93	0,00788
0,91	6062,55	105,91	576,92	494,29	0,0011	494,52	0,00787
0,92	6062,55	105,91	577,55	494,76	0,0009	494,83	0,00787
0,93	6062,55	105,91	577,75	494,90	0,0008	494,77	0,00787
0,94	6062,55	105,91	577,40	494,64	0,0007	494,24	0,00788
0,95	6062,55	105,91	576,31	493,84	0,0006	493,06	0,00790
0,96	6062,55	105,91	574,18	492,28	0,0005	490,92	0,00793
0,97	6062,55	105,91	570,47	489,55	0,0004	487,15	0,00799
0,98	6062,55	105,91	563,97	484,76	0,0002	479,92	0,00811
0,99	6062,55	105,91	550,92	475,08	0,0001	Ukupna potrebna površina A[m ²]	1,16252

Usporedba izmjene topline za Shell&Tube izmjenjivač-3.3.3.5. Tang et al. (1997)						
Sadržaj pare	Reynoldsov broj za kapljevinu	Ukupni koeficijent prijelaza topline	Koeficijent prolaza topline	Maseni tok kondenzata	Koeficijent prolaza topline između dviju koordinata sadržaja pare	Potrebna površina
x [kg/kg]	Re _i [-]	α _{rg} [W/m2k]	k [W/m2k]	q _{m,i} [kg/s]	\bar{k} [W/m2k]	ΔA[m ²]
0,01	6001,93	118,87	114,91	0,0117	119,58	0,03256
0,02	5941,30	128,88	124,24	0,0115	128,46	0,03031
0,03	5880,68	137,99	132,69	0,0114	136,65	0,02849
0,04	5820,05	146,58	140,60	0,0113	144,37	0,02697
0,05	5759,43	154,78	148,14	0,0112	151,75	0,02565
0,06	5698,80	162,69	155,37	0,0111	158,87	0,02451
0,07	5638,17	170,38	162,36	0,0110	165,76	0,02349
0,08	5577,55	177,87	169,15	0,0108	172,46	0,02257
0,09	5516,92	185,19	175,76	0,0107	178,99	0,02175
0,1	5456,30	192,38	182,22	0,0106	185,38	0,02100
0,11	5395,67	199,43	188,54	0,0105	191,64	0,02032
0,12	5335,05	206,38	194,73	0,0104	197,77	0,01969
0,13	5274,42	213,22	200,81	0,0103	203,80	0,01910
0,14	5213,80	219,97	206,79	0,0101	209,74	0,01856
0,15	5153,17	226,64	212,68	0,0100	215,57	0,01806
0,16	5092,54	233,24	218,47	0,0099	221,33	0,01759
0,17	5031,92	239,76	224,18	0,0098	227,00	0,01715
0,18	4971,29	246,22	229,82	0,0097	232,60	0,01674
0,19	4910,67	252,61	235,38	0,0095	238,13	0,01635
0,2	4850,04	258,95	240,88	0,0094	243,59	0,01598
0,21	4789,42	265,24	246,31	0,0093	248,99	0,01564
0,22	4728,79	271,47	251,68	0,0092	254,33	0,01531
0,23	4668,17	277,66	256,99	0,0091	259,61	0,01500
0,24	4607,54	283,81	262,24	0,0090	264,84	0,01470
0,25	4546,91	289,91	267,44	0,0088	270,02	0,01442
0,26	4486,29	295,97	272,59	0,0087	275,15	0,01415
0,27	4425,66	302,00	277,70	0,0086	280,23	0,01389
0,28	4365,04	307,99	282,75	0,0085	285,26	0,01365
0,29	4304,41	313,94	287,77	0,0084	290,25	0,01341
0,3	4243,79	319,87	292,74	0,0082	295,20	0,01319
0,31	4183,16	325,76	297,66	0,0081	300,11	0,01297
0,32	4122,54	331,62	302,55	0,0080	304,98	0,01277
0,33	4061,91	337,46	307,40	0,0079	309,81	0,01257
0,34	4001,29	343,27	312,22	0,0078	314,61	0,01237
0,35	3940,66	349,06	317,00	0,0077	319,37	0,01219
0,36	3880,03	354,82	321,74	0,0075	324,10	0,01201
0,37	3819,41	360,56	326,45	0,0074	328,79	0,01184
0,38	3758,78	366,28	331,13	0,0073	333,46	0,01168
0,39	3698,16	371,97	335,78	0,0072	338,09	0,01152
0,4	3637,53	377,65	340,40	0,0071	342,70	0,01136
0,41	3576,91	383,31	344,99	0,0070	347,28	0,01121
0,42	3516,28	388,95	349,56	0,0068	351,83	0,01107
0,43	3455,66	394,58	354,09	0,0067	356,35	0,01093
0,44	3395,03	400,19	358,60	0,0066	360,85	0,01079
0,45	3334,40	405,78	363,09	0,0065	365,32	0,01066
0,46	3273,78	411,36	367,55	0,0064	369,77	0,01053
0,47	3213,15	416,93	371,99	0,0062	374,20	0,01040
0,48	3152,53	422,48	376,40	0,0061	378,60	0,01028
0,49	3091,90	428,02	380,80	0,0060	382,98	0,01017
0,5	3031,28	433,55	385,17	0,0059	387,35	0,01005
0,51	2970,65	439,08	389,52	0,0058	391,69	0,00994
0,52	2910,03	444,59	393,85	0,0057	396,01	0,00983
0,53	2849,40	450,10	398,17	0,0055	400,32	0,00973
0,54	2788,77	455,59	402,47	0,0054	404,61	0,00962
0,55	2728,15	461,09	406,75	0,0053	408,88	0,00952
0,56	2667,52	466,57	411,01	0,0052	413,13	0,00942
0,57	2606,90	472,05	415,26	0,0051	417,37	0,00933
0,58	2546,27	477,53	419,49	0,0049	421,60	0,00923
0,59	2485,65	483,01	423,71	0,0048	425,81	0,00914
0,6	2425,02	488,48	427,92	0,0047	430,01	0,00905
0,61	2364,40	493,95	432,11	0,0046	434,20	0,00897
0,62	2303,77	499,43	436,29	0,0045	438,38	0,00888
0,63	2243,14	504,90	440,47	0,0044	442,55	0,00880
0,64	2182,52	510,38	444,63	0,0042	446,71	0,00872
0,65	2121,89	515,86	448,78	0,0041	450,86	0,00864
0,66	2061,27	521,35	452,93	0,0040	455,00	0,00856
0,67	2000,64	526,85	457,07	0,0039	459,14	0,00848
0,68	1940,02	532,35	461,21	0,0038	463,28	0,00840
0,69	1879,39	537,87	465,34	0,0037	467,41	0,00833
0,7	1818,77	543,39	469,47	0,0035	471,54	0,00826
0,71	1758,14	548,93	473,60	0,0034	475,67	0,00818
0,72	1697,51	554,49	477,73	0,0033	479,80	0,00811
0,73	1636,89	560,06	481,87	0,0032	483,93	0,00804
0,74	1576,26	565,66	486,00	0,0031	488,07	0,00798
0,75	1515,64	571,28	490,15	0,0029	492,22	0,00791
0,76	1455,01	576,92	494,30	0,0028	496,38	0,00784
0,77	1394,39	582,60	498,46	0,0027	500,55	0,00778
0,78	1333,76	588,31	502,63	0,0026	504,73	0,00771
0,79	1273,14	594,07	506,83	0,0025	508,93	0,00765
0,8	1212,51	599,86	511,04	0,0024	513,16	0,00759
0,81	1151,89	605,71	515,28	0,0022	517,41	0,00752
0,82	1091,26	611,62	519,55	0,0021	521,70	0,00746
0,83	1030,63	617,59	523,85	0,0020	526,02	0,00740
0,84	970,01	623,64	528,19	0,0019	530,39	0,00734
0,85	909,38	629,77	532,59	0,0018	534,82	0,00728
0,86	848,76	636,01	537,04	0,0016	539,30	0,00722
0,87	788,13	642,36	541,57	0,0015	543,87	0,00716
0,88	727,51	648,86	546,18	0,0014	548,53	0,00710
0,89	666,88	655,52	550,89	0,0013	553,31	0,00704
0,9	606,26	662,38	555,73	0,0012	558,23	0,00697
0,91	545,63	669,49	560,72	0,0011	563,32	0,00691
0,92	485,00	676,92	565,92	0,0009	568,65	0,00685
0,93	424,38	684,73	571,37	0,0008	574,27	0,00678
0,94	363,75	693,08	577,17	0,0007	580,31	0,00671
0,95	303,13	702,16	583,45	0,0006	586,95	0,00663
0,96	242,50	712,30	590,44	0,0005	594,51	0,00655
0,97	181,88	724,17	598,57	0,0004	603,70	0,00645
0,98	121,25	739,22	608,82	0,0002	616,58	0,00631
0,99	60,63	762,23	624,34	0,0001	Ukupna potrebna površina A[m ²]	1,19286

Usporedba izmjene topline za konstruirani Shell&Tube izmjenjivač-3.3.3.6. Dobson-Chato (1998)											
Sadržaj pare	Reynoldsov broj za kapljevinu	Martinellijev parametar	Prijelazni kriterij	Vrsta strujanja	Kut od vrha cijevi do kodenzata	Prisilna konvekcija	Koeficijent prijelaza topline	Koeficijent prolaza topline	Maseni tok kondenzata	Koeficijent prolaza topline između dviju koordinata sadržaja pare	Potrebna površina
x [kg/kg]	Re _f [-]	X _{tt} [-]	Fr _{so}	[-]	θ[rad ⁻¹]	Nu[-]	α _{DC} [W/m2k]	k [W/m2k]	q _m [kg/s]	\bar{k} [W/m2k]	ΔA[m ²]
0,01	6001,93	6,2457	0,0239	valovito-slojevito	0,976	38,62	483,17	423,83	0,0117	468,49	0,00831
0,02	5941,30	3,3165	0,0599	valovito-slojevito	1,292	42,29	602,76	513,14	0,0115	546,39	0,00713
0,03	5880,68	2,2814	0,1026	valovito-slojevito	1,496	55,03	696,64	579,64	0,0114	601,99	0,00647
0,04	5820,05	1,7446	0,1506	valovito-slojevito	1,645	62,71	762,22	624,33	0,0113	642,09	0,00606
0,05	5759,43	1,4138	0,2028	valovito-slojevito	1,761	70,40	815,81	659,84	0,0112	668,88	0,00582
0,06	5698,80	1,1885	0,2589	valovito-slojevito	1,855	63,02	843,61	677,91	0,0111	690,19	0,00564
0,07	5638,17	1,0246	0,3184	valovito-slojevito	1,933	68,67	881,98	702,46	0,0110	713,16	0,00546
0,08	5577,55	0,8998	0,3811	valovito-slojevito	2,000	74,35	915,96	723,85	0,0108	733,30	0,00531
0,09	5516,92	0,8014	0,4467	valovito-slojevito	2,057	80,03	946,45	742,76	0,0107	751,22	0,00518
0,10	5456,30	0,7216	0,5151	valovito-slojevito	2,108	85,69	974,10	759,68	0,0106	767,33	0,00507
0,11	5395,67	0,6557	0,5861	valovito-slojevito	2,153	91,32	999,39	774,98	0,0105	781,95	0,00498
0,12	5335,05	0,6002	0,6597	valovito-slojevito	2,194	96,92	1022,70	788,92	0,0104	795,32	0,00490
0,13	5274,42	0,5527	0,7358	valovito-slojevito	2,230	102,48	1044,30	801,72	0,0103	807,62	0,00482
0,14	5213,80	0,5117	0,8142	valovito-slojevito	2,264	108,00	1064,44	813,53	0,0101	819,01	0,00475
0,15	5153,17	0,4759	0,8950	valovito-slojevito	2,294	113,48	1083,29	824,50	0,0100	829,61	0,00469
0,16	5092,54	0,4443	0,9781	valovito-slojevito	2,323	118,91	1101,00	834,72	0,0099	839,50	0,00464
0,17	5031,92	0,4162	1,0633	valovito-slojevito	2,349	124,31	1117,71	844,29	0,0098	848,78	0,00459
0,18	4971,29	0,3910	1,1508	valovito-slojevito	2,373	129,66	1133,53	853,28	0,0097	857,52	0,00454
0,19	4910,67	0,3684	1,2404	valovito-slojevito	2,396	134,97	1148,54	861,76	0,0095	865,76	0,00450
0,20	4850,04	0,3478	1,3322	valovito-slojevito	2,417	140,25	1162,81	869,77	0,0094	873,57	0,00446
0,21	4789,42	0,3291	1,4261	valovito-slojevito	2,437	145,48	1176,43	877,37	0,0093	880,97	0,00442
0,22	4728,79	0,3120	1,5221	valovito-slojevito	2,456	150,68	1189,44	884,58	0,0092	888,02	0,00438
0,23	4668,17	0,2963	1,6203	valovito-slojevito	2,474	155,84	1201,91	891,46	0,0091	894,74	0,00435
0,24	4607,54	0,2819	1,7205	valovito-slojevito	2,491	160,96	1213,86	898,02	0,0090	901,15	0,00432
0,25	4546,91	0,2685	1,8228	valovito-slojevito	2,507	166,06	1225,35	904,29	0,0088	907,29	0,00429
0,26	4486,29	0,2561	1,9272	valovito-slojevito	2,523	171,11	1236,41	910,30	0,0087	913,18	0,00426
0,27	4425,66	0,2445	2,0337	valovito-slojevito	2,538	176,14	1247,07	916,06	0,0086	918,83	0,00424
0,28	4365,04	0,2337	2,1423	valovito-slojevito	2,552	181,14	1257,35	921,60	0,0085	924,27	0,00421
0,29	4304,41	0,2236	2,2531	valovito-slojevito	2,565	186,10	1267,30	926,93	0,0084	929,50	0,00419
0,30	4243,79	0,2141	2,3659	valovito-slojevito	2,578	191,04	1276,91	932,07	0,0082	934,54	0,00417
0,31	4183,16	0,2052	2,4810	valovito-slojevito	2,591	195,95	1286,23	937,02	0,0081	939,41	0,00414
0,32	4122,54	0,1968	2,5981	valovito-slojevito	2,603	200,83	1295,26	941,81	0,0080	944,12	0,00412
0,33	4061,91	0,1889	2,7175	valovito-slojevito	2,614	205,68	1304,03	946,43	0,0079	948,67	0,00410
0,34	4001,29	0,1815	2,8391	valovito-slojevito	2,625	210,51	1312,55	950,91	0,0078	953,08	0,00408
0,35	3940,66	0,1744	2,9629	valovito-slojevito	2,636	215,31	1320,84	955,25	0,0077	957,36	0,00407
0,36	3880,03	0,1676	3,0890	valovito-slojevito	2,647	220,09	1328,90	959,46	0,0075	961,51	0,00405
0,37	3819,41	0,1613	3,2174	valovito-slojevito	2,657	224,84	1336,75	963,55	0,0074	965,54	0,00403
0,38	3758,78	0,1552	3,3482	valovito-slojevito	2,667	229,57	1344,41	967,52	0,0073	969,45	0,00402
0,39	3698,16	0,1494	3,4813	valovito-slojevito	2,676	234,28	1351,88	971,39	0,0072	973,27	0,00400
0,40	3637,53	0,1439	3,6168	valovito-slojevito	2,686	238,97	1359,17	975,14	0,0071	976,98	0,00398
0,41	3576,91	0,1386	3,7548	valovito-slojevito	2,695	243,63	1366,30	978,81	0,0070	980,59	0,00397
0,42	3516,28	0,1336	3,8953	valovito-slojevito	2,703	248,27	1373,26	982,38	0,0068	984,12	0,00396
0,43	3455,66	0,1287	4,0384	valovito-slojevito	2,712	252,90	1380,07	985,86	0,0067	987,56	0,00394
0,44	3395,03	0,1241	4,1842	valovito-slojevito	2,720	257,50	1386,74	989,26	0,0066	990,92	0,00393
0,45	3334,40	0,1197	4,3326	valovito-slojevito	2,729	262,08	1393,28	992,58	0,0065	994,20	0,00392
0,46	3273,78	0,1154	4,4838	valovito-slojevito	2,737	266,64	1399,68	995,82	0,0064	997,41	0,00390
0,47	3213,15	0,1113	4,6378	valovito-slojevito	2,745	271,18	1405,96	999,00	0,0062	1000,55	0,00389
0,48	3152,53	0,1073	4,7947	valovito-slojevito	2,752	275,71	1412,12	1002,10	0,0061	1003,62	0,00388
0,49	3091,90	0,1035	4,9545	valovito-slojevito	2,760	280,22	1418,17	1005,15	0,0060	1006,64	0,00387
0,50	3031,28	0,0999	5,1175	valovito-slojevito	2,767	284,71	1424,11	1008,13	0,0059	1009,59	0,00386
0,51	2970,65	0,0964	5,2836	valovito-slojevito	2,774	289,18	1429,95	1011,05	0,0058	1012,48	0,00385
0,52	2910,03	0,0929	5,4530	valovito-slojevito	2,782	293,63	1435,69	1013,92	0,0057	1015,32	0,00383
0,53	2849,40	0,0896	5,6258	valovito-slojevito	2,789	298,07	1441,34	1016,73	0,0055	1018,11	0,00382
0,54	2788,77	0,0865	5,8020	valovito-slojevito	2,795	302,49	1446,91	1019,50	0,0054	1020,85	0,00381
0,55	2728,15	0,0834	5,9819	valovito-slojevito	2,802	306,90	1452,38	1022,21	0,0053	1023,55	0,00380
0,56	2667,52	0,0804	6,1655	valovito-slojevito	2,809	311,29	1457,78	1024,88	0,0052	1026,20	0,00379
0,57	2606,90	0,0775	6,3530	valovito-slojevito	2,815	315,66	1463,10	1027,51	0,0051	1028,80	0,00378
0,58	2546,27	0,0747	6,5445	valovito-slojevito	2,822	320,02	1468,35	1030,10	0,0049	1031,37	0,00377
0,59	2485,65	0,0720	6,7402	valovito-slojevito	2,828	324,36	1473,53	1032,65	0,0048	1033,90	0,00377
0,60	2425,02	0,0693	6,9404	valovito-slojevito	2,835	328,69	1478,65	1035,16	0,0047	984,59	0,00395
0,61	2364,40	0,0668	7,1451	prstenasto	-	-	1280,60	934,03	0,0046	938,05	0,00415
0,62	2303,77	0,0643	7,3546	prstenasto	-	-	1295,74	942,06	0,0045	946,03	0,00412
0,63	2243,14	0,0619	7,5692	prstenasto	-	-	1310,83	950,01	0,0044	953,94	0,00408
0,64	2182,52	0,0595	7,7891	prstenasto	-	-	1325,86	957,88	0,0042	961,78	0,00405
0,65	2121,89	0,0572	8,0145	prstenasto	-	-	1340,84	965,67	0,0041	969,53	0,00402
0,66	2061,27	0,0550	8,2457	prstenasto	-	-	1355,77	973,39	0,0040	977,21	0,00398
0,67	2000,64	0,0528	8,4832	prstenasto	-	-	1370,64	981,03	0,0039	984,82	0,00395
0,68	1940,02	0,0507	8,7272	prstenasto	-	-	1385,46	988,60	0,0038	992,35	0,00392
0,69	1879,39	0,0486	8,9781	prstenasto	-	-	1400,23	996,10	0,0037	999,82	0,00389
0,70	1818,77	0,0466	9,2365	prstenasto	-	-	1414,95	1003,53	0,0035	1007,21	0,00387
0,71	1758,14	0,0446	9,5027	prstenasto	-	-	1429,63	1010,89	0,0034	1014,53	0,00384
0,72	1697,51	0,0427	9,7773	prstenasto	-	-	1444,25	1018,18	0,0033	1021,79	0,00381
0,73	1636,89	0,0408	10,0610	prstenasto	-	-	1458,82	1025,40	0,0032	1028,98	0,00378
0,74	1576,26	0,0390	10,3544	prstenasto	-	-	1473,35	1032,56	0,0031	1036,10	0,00376
0,75	1515,64	0,0372	10,6582	prstenasto	-	-	1487,83	1039,65	0,0029	1043,16	0,00373
0,76	1455,01	0,0354	10,9734	prstenasto	-	-	1502,27	1046,67	0,0028	1050,16	0,00371
0,77	1394,39	0,0337	11,3009	prstenasto	-	-	1516,65	1053,64	0,0027	1057,09	0,00368
0,78	1333,76	0,0320	11,6419	prstenasto	-	-	1531,00	1060,54	0,0026	1063,96	0,00366
0,79	1273,14	0,0303	11,9976	prstenasto	-	-	1545,29	1067,38	0,0025	1070,77	0,00364
0,80	1212,51	0,0287	12,1885	prstenasto	-	-	1559,54	1074,16	0,0024	1077,52	0,00361
0,81	1151,89	0,0271	12,2230	prstenasto	-	-	1573,75	1080,88	0,0022	1084,21	0,00359
0,82	1091,26	0,0255	12,2461	prstenasto	-	-	1587,92	1087,54	0,0021	1090,85	0,00357
0,83	1030,63	0,0240	12,2569	prstenasto	-	-	1602,04	1094,15	0,0020	1097,42	0,00355
0,84	970,01	0,0225	12,2540	prstenasto	-	-	1616,11	1100,70	0,0019	1103,94	0,00353
0,85	909,38	0,0210	12,2361	prstenasto	-	-	1630,15	1107,19	0,0018	1110,41	0,00351
0,86	848,76	0,0195	12,2016	prstenasto	-	-	1644,14	1113,62	0,0016	1116,82	0,00349
0,87	788,13	0,0181	12,1486	prstenasto	-	-	1658,08	1120,01	0,0015	1123,17	0,00347
0,88	727,51	0,0166	12,0746	prstenasto	-	-	1671,99	1126,33	0,0014	1129,47	0,00345
0,89	666,88	0,0152	11,9770	prstenasto	-	-	1685,85	1132,61	0,0013	1135,72	0,00343
0,90	606,26	0,0138	11,8521	prstenasto	-	-	1699,68	1138,8			

Usporedba izmjene topline za konstruirani Shell&Tube izmjenjivač 3.3.3.7. VDI Heat Atlas

Sadržaj pare	Reynoldsov broj za kapljevinu	Reynoldsov broj za paru	Parametar strujanja	Volumetrički sadržaj pare	Debljina filma	Karakteristična duljina	Laminarni Nusseltov broj	Turbulentni Nusseltov broj	Nusseltov broj	Maseni tok pare	Brzina pare	Faktor otpora	Smično naprezanje	Korekcija	Koeficijent prijelaza topline	Koeficijent prolaza topline	Maseni tok kondenzata	Koeficijent prolaza topline između dviju koordinata sadržaja pare	Potrebna površina
x [kg/kg]	Re _f [-]	Re _p [-]	F	ε [-]	δ [m]	L	Nu _{l,m} [-]	Nu _t [-]	Nu [-]	q _{m,v} [kg/s]	u [m/s]	f [-]	τ [N/mm ²]	K _w	α _{qm} [W/m ² k]	k [W/m ² k]	q _m [kg/s]	\bar{k} [W/m ² k]	ΔA [m ²]
0,01	1500,48	132,72	0,82	0,13	0,0066	1,64304E-05	0,0839	0,222329153	0,2376	0,00012	0,17	48,5759	0,5577	0,268211	332,8525	303,5748	0,01167	330,71	0,01177
0,02	1485,33	265,45	0,44	0,21	0,0059	1,64304E-05	0,0842	0,221381079	0,2368	0,00024	0,30	25,8269	0,8802	0,322787	399,2351	357,8411	0,01155	374,21	0,01040
0,03	1470,17	398,17	0,30	0,28	0,0054	1,64304E-05	0,0844	0,220426654	0,2360	0,00035	0,40	17,7872	1,0924	0,357306	440,4333	390,5887	0,01143	402,68	0,00967
0,04	1455,01	530,89	0,23	0,34	0,0050	1,64304E-05	0,0847	0,219465772	0,2352	0,00047	0,49	13,6186	1,2484	0,383768	471,4366	414,7790	0,01131	424,64	0,00917
0,05	1439,86	663,61	0,19	0,39	0,0046	1,64304E-05	0,0850	0,218498325	0,2344	0,00059	0,57	11,0494	1,3724	0,40604	497,0817	434,5015	0,01119	443,01	0,00879
0,06	1424,70	796,34	0,16	0,43	0,0043	1,64304E-05	0,0852	0,2175242	0,2336	0,00071	0,65	9,2994	1,4765	0,425802	519,4671	451,5088	0,01108	459,10	0,00848
0,07	1409,54	929,06	0,14	0,47	0,0040	1,64304E-05	0,0855	0,216543284	0,2328	0,00082	0,72	8,0267	1,5675	0,443907	539,6634	466,6892	0,01096	473,62	0,00822
0,08	1394,39	1061,78	0,12	0,50	0,0038	1,64304E-05	0,0857	0,215555458	0,2320	0,00094	0,79	7,0573	1,6493	0,460841	558,2781	480,5455	0,01084	486,97	0,00799
0,09	1379,23	1194,51	0,11	0,53	0,0035	1,64304E-05	0,0860	0,214560601	0,2312	0,00106	0,85	6,2929	1,7242	0,476901	575,6846	493,3864	0,01072	499,40	0,00780
0,10	1364,07	1327,23	0,10	0,55	0,0034	1,64304E-05	0,0863	0,213558588	0,2303	0,00118	0,92	5,6739	1,7938	0,492281	592,1264	505,4142	0,01060	511,09	0,00762
0,11	1348,92	1459,95	0,09	0,58	0,0032	1,64304E-05	0,0866	0,212549292	0,2295	0,00130	0,98	5,1617	1,8592	0,507115	607,7703	516,7678	0,01049	522,16	0,00746
0,12	1333,76	1592,68	0,08	0,60	0,0030	1,64304E-05	0,0869	0,211532581	0,2287	0,00141	1,04	4,7305	1,9211	0,521495	622,7355	527,5472	0,01037	532,69	0,00731
0,13	1318,61	1725,40	0,07	0,62	0,0029	1,64304E-05	0,0871	0,210508317	0,2278	0,00153	1,10	4,3621	1,9801	0,535493	637,1099	537,8268	0,01025	542,75	0,00717
0,14	1303,45	1858,12	0,07	0,64	0,0027	1,64304E-05	0,0874	0,209476363	0,2270	0,00165	1,15	4,0435	2,0364	0,54916	650,9604	547,6637	0,01013	552,38	0,00705
0,15	1288,29	1990,84	0,06	0,65	0,0026	1,64304E-05	0,0877	0,208436574	0,2262	0,00177	1,21	3,7652	2,0904	0,562539	664,3394	557,1027	0,01002	561,64	0,00693
0,16	1273,14	2123,57	0,06	0,67	0,0025	1,64304E-05	0,0880	0,2073888	0,2253	0,00189	1,27	3,5196	2,1422	0,575661	677,2884	566,1801	0,00990	570,55	0,00682
0,17	1257,98	2256,29	0,05	0,68	0,0024	1,64304E-05	0,0883	0,20633289	0,2245	0,00200	1,33	3,3014	2,1921	0,588554	689,8414	574,9257	0,00978	579,15	0,00672
0,18	1242,82	2389,01	0,05	0,70	0,0023	1,64304E-05	0,0887	0,205268685	0,2236	0,00212	1,38	3,1060	2,2401	0,60124	702,0265	583,3645	0,00966	587,44	0,00663
0,19	1227,67	2521,74	0,05	0,71	0,0022	1,64304E-05	0,0890	0,204196023	0,2227	0,00224	1,44	2,9300	2,2863	0,613737	713,8673	591,5174	0,00954	595,46	0,00654
0,20	1212,51	2654,46	0,05	0,72	0,0021	1,64304E-05	0,0893	0,203114736	0,2219	0,00236	1,49	2,7706	2,3309	0,62606	725,3838	599,4028	0,00943	603,22	0,00645
0,21	1197,35	2787,18	0,04	0,73	0,0020	1,64304E-05	0,0896	0,20202465	0,2210	0,00247	1,55	2,6254	2,3738	0,638224	736,5935	607,0365	0,00931	610,73	0,00637
0,22	1182,20	2919,90	0,04	0,74	0,0019	1,64304E-05	0,0900	0,200925587	0,2201	0,00259	1,60	2,4927	2,4152	0,65024	747,5116	614,4323	0,00919	618,02	0,00630
0,23	1167,04	3052,63	0,04	0,75	0,0019	1,64304E-05	0,0903	0,199817361	0,2193	0,00271	1,66	2,3707	2,4550	0,662119	758,1513	621,6027	0,00907	625,08	0,00623
0,24	1151,89	3185,35	0,04	0,76	0,0018	1,64304E-05	0,0906	0,198699781	0,2184	0,00283	1,71	2,2584	2,4933	0,67387	768,5246	628,5588	0,00896	631,93	0,00616
0,25	1136,73	3318,07	0,04	0,77	0,0017	1,64304E-05	0,0910	0,197572651	0,2175	0,00295	1,76	2,1544	2,5301	0,685502	778,6421	635,3104	0,00884	638,59	0,00610
0,26	1121,57	3450,80	0,03	0,78	0,0017	1,64304E-05	0,0913	0,196435764	0,2166	0,00306	1,82	2,0579	2,5655	0,697021	788,5134	641,8667	0,00872	645,05	0,00604
0,27	1106,42	3583,52	0,03	0,79	0,0016	1,64304E-05	0,0917	0,19528891	0,2157	0,00318	1,87	1,9681	2,5993	0,708435	798,1474	648,2361	0,00860	651,33	0,00598
0,28	1091,26	3716,24	0,03	0,79	0,0016	1,64304E-05	0,0921	0,194131869	0,2149	0,00330	1,92	1,8843	2,6318	0,71975	807,5521	654,4260	0,00848	657,43	0,00592
0,29	1076,10	3848,96	0,03	0,80	0,0015	1,64304E-05	0,0924	0,192964416	0,2140	0,00342	1,98	1,8058	2,6628	0,730972	816,7349	660,4435	0,00837	663,37	0,00587
0,30	1060,95	3981,69	0,03	0,81	0,0015	1,64304E-05	0,0928	0,191786313	0,2131	0,00353	2,03	1,7323	2,6924	0,742107	825,7027	666,2952	0,00825	669,14	0,00582
0,31	1045,79	4114,41	0,03	0,81	0,0014	1,64304E-05	0,0932	0,190597319	0,2122	0,00365	2,08	1,6631	2,7205	0,753158	834,4621	671,9873	0,00813	674,76	0,00577
0,32	1030,63	4247,13	0,03	0,82	0,0014	1,64304E-05	0,0936	0,18939718	0,2113	0,00377	2,13	1,5980	2,7473	0,764132	843,0189	677,5254	0,00801	680,22	0,00572
0,33	1015,48	4379,86	0,02	0,83	0,0013	1,64304E-05	0,0940	0,188185632	0,2104	0,00389	2,19	1,5366	2,7726	0,775033	851,3792	682,9149	0,00789	685,54	0,00568
0,34	1000,32	4512,58	0,02	0,83	0,0013	1,64304E-05	0,0944	0,186962405	0,2095	0,00401	2,24	1,4785	2,7965	0,785864	859,5482	688,1609	0,00778	690,71	0,00564
0,35	985,16	4645,30	0,02	0,84	0,0012	1,64304E-05	0,0948	0,185727215	0,2085	0,00412	2,29	1,4234	2,8190	0,79663	867,5313	693,2684	0,00766	695,76	0,00560
0,36	970,01	4778,03	0,02	0,84	0,0012	1,64304E-05	0,0953	0,184479767	0,2076	0,00424	2,34	1,3712	2,8401	0,807334	875,3334	698,2419	0,00754	700,66	0,00556
0,37	954,85	4910,75	0,02	0,85	0,0011	1,64304E-05	0,0957	0,183219754	0,2067	0,00436	2,39	1,3217	2,8598	0,817982	882,9596	703,0860	0,00742	705,45	0,00552
0,38	939,70	5043,47	0,02	0,85	0,0011	1,64304E-05	0,0961	0,181946859	0,2058	0,00448	2,45	1,2745	2,8781	0,828575	890,4146	707,8048	0,00731	710,10	0,00548
0,39	924,54	5176,19	0,02	0,86	0,0011	1,64304E-05	0,0966	0,180660749	0,2049	0,00460	2,50	1,2295	2,8949	0,839118	897,7031	712,4027	0,00719	714,64	0,00545
0,40	909,38	5308,92	0,02	0,86	0,0010	1,64304E-05	0,0971	0,179361079	0,2039	0,00471	2,55	1,1866	2,9104	0,849615	904,8298	716,8835	0,00707	719,07	0,00541
0,41	894,23	5441,64	0,02	0,87	0,0010	1,64304E-05	0,0975	0,178047487	0,2030	0,00483	2,60	1,1457	2,9244	0,860068	911,7992	721,2513	0,00695	723,38	0,00538
0,42	879,07	5574,36	0,02	0,87	0,0009	1,64304E-05	0,0980	0,176719597	0,2021	0,00495	2,65	1,1065	2,9370	0,870481	918,6160	725,5101	0,00683	727,59	0,00535
0,43	863,91	5707,09	0,02	0,87	0,0009	1,64304E-05	0,0985	0,175377015	0,2012	0,00507	2,70	1,0690	2,9481	0,880857	925,2849	729,6635	0,00672	731,69	0,00532
0,44	848,76	5839,81	0,02	0,88	0,0009	1,64304E-05	0,0990	0,174019331	0,2002	0,00518	2,75	1,0330	2,9578	0,8912	931,8105	733,7155	0,00660	735,69	0,00529
0,45	833,60	5972,53	0,02	0,88	0,0009	1,64304E-05	0,0995	0,172646115	0,1993	0,00530	2,80	0,9985	2,9661	0,901513	938,1977	737,6699	0,00648	739,60	0,00526
0,46	818,44	6105,25	0,02	0,89	0,0009	1,64304E-05	0,1001	0,171256918	0,1984	0,00542	2,86	0,9654	2,9730	0,911799	944,4514	741,5304	0,00636	743,42	0,00524
0,47	803,29	6237,98	0,01	0,89	0,0008	1,64304E-05	0,1006	0,169851267	0,1974	0,00554	2,91	0,9336	2,9826	0,92062	950,5766	745,3011	0,00625	747,14	0,00521
0,48	788,13	6370,70	0,01	0,89	0,0008	1,64304E-05	0,1012	0,168428669	0,1965	0,00566	2,96	0,9029	2,9823	0,932305	956,5788	748,9858	0,00613	750,79	0,00519
0,49	772,98	6503,42	0,01	0,90	0,0008	1,64304E-05	0,1017	0,166988606	0,1955	0,00577	3,01	0,8734	2,9848	0,942532	962,4633	752,5886	0,00601	754,35	0,00516
0,50	757,82	6636,15	0,01	0,90	0,0008	1,64304E-05	0,1023	0,165530532	0,1946	0,00589	3,06	0,8450	2,9858	0,952747	968,2360	756,1136	0,00589	757,84	0,00514

Termodinamički proračun koeficijenta prijelaza topline na strani radne tvari i potrebne duljine izmjenjivača prema 3.3.3.7 VDI Heat Atlas										
Sadržaj pare	Reynoldsov broj za kapljevinu	Reynoldsov broj za paru	Parametar strujanja	Volumetrički sadržaj pare	Debljina filma	Karakteristična duljina	Lmaninarni Nusseltov broj	Turbulentni Nusseltov broj	Nusseltov broj	Maseni tok pare
x [kg/kg]	Re _l [-]	Re _g [-]	F	ε[-]	δ[m]	L	Nu _{l,m} [-]	Nu _t [-]	Nu[-]	q _{m,v} [kg/s]
0,01	1246,417	110,250	0,82443	0,12514	0,00547	1,47017E-05	0,08858	0,20552	0,22380	0,00008
0,10	1133,107	1102,500	0,09526	0,55316	0,00279	1,47017E-05	0,09107	0,19730	0,21730	0,00082
0,20	1007,206	2205,000	0,04591	0,71976	0,00175	1,47017E-05	0,09423	0,18752	0,20986	0,00163
0,30	881,305	3307,501	0,02827	0,80665	0,00121	1,47017E-05	0,09795	0,17692	0,20222	0,00245
0,40	755,404	4410,001	0,01899	0,86129	0,00087	1,47017E-05	0,10243	0,16530	0,19446	0,00326
0,50	629,504	5512,501	0,01319	0,89943	0,00063	1,47017E-05	0,10799	0,15238	0,18676	0,00408
0,60	503,603	6615,001	0,00915	0,92797	0,00045	1,47017E-05	0,11521	0,13772	0,17955	0,00489
0,70	377,702	7717,501	0,00615	0,95043	0,00031	1,47017E-05	0,12523	0,12057	0,17384	0,00571
0,80	251,801	8820,001	0,00444	0,96369	0,00023	1,47017E-05	0,14086	0,09947	0,17244	0,00653
0,90	125,901	9922,502	0,00283	0,97660	0,00015	1,47017E-05	0,17222	0,07065	0,18615	0,00734
0,99	12,590	10914,752	0,00082	0,99309	0,00004	1,47017E-05	0,33581	0,02025	0,33642	0,00808
Sadržaj pare	Brzina pare	Faktor otpora	Smično naprezanje	Korekcija	Koeficijent prijelaza topline	Koeficijent prolaza topline	Maseni tok kondenzata	Koeficijent prolaza topline između dviju koordinata sadržaja pare	Potrebna duljina	Pad taka
x [kg/kg]	u[m/s]	f[-]	τ[N/mm ²]	K _w	α _{VDI} [W/m2k]	k [W/m2k]	q _{m,l} [kg/s]	κ̄ [W/m2k]	ΔL[m]	Δp[m]
0,01	0,17	0,07184	0,57505	0,285	371,594	315,723	0,00808	382,397	0,808	168,10
0,10	0,91	0,04533	1,16713	0,450	571,232	449,070	0,00734	478,906	0,716	174,25
0,20	1,49	0,03946	1,32026	0,548	671,407	508,742	0,00653	530,031	0,647	160,17
0,30	2,02	0,03638	1,40621	0,633	747,602	551,319	0,00571	567,513	0,605	149,88
0,40	2,54	0,03435	1,43508	0,712	808,427	583,706	0,00489	596,594	0,575	139,14
0,50	3,05	0,03285	1,40801	0,788	858,727	609,483	0,00408	620,729	0,553	126,30
0,60	3,55	0,03167	1,32477	0,863	904,064	631,976	0,00326	644,188	0,533	110,26
0,70	4,05	0,03071	1,18394	0,941	954,892	656,400	0,00245	674,311	0,509	96,02
0,80	4,56	0,02990	1,12404	1,026	1032,627	692,221	0,00163	733,133	0,468	79,37
0,90	5,07	0,02921	0,96398	1,128	1225,950	774,044	0,00082	983,585	0,314	38,37
0,99	5,48	0,02866	0,55221	1,407	2763,097	1193,126	0,00008	Ukupna potrebna površina L[m]	5,728	
Ukupan pad tlaka Δp[Pa]										1241,86

Jednofazni jedinični padovi tlaka za Shell&Tube izmjenjivač									
Sadržaj pare	Srednji sadržaj pare	Reynoldsov broj za kapljevinu	Reynoldsov broj za paru	Faktor otpora	Faktor otpora	Jedinični pad tlaka kapljevine	Jedinični pad tlaka pare	Jedinični pad tlaka samo kapljevine	Jedinični pad tlaka samo pare
x [kg/kg]	\bar{x} [kg/kg]	Re _l [-]	Re _v [-]	f _l [-]	f _v [-]	(dp/dz) _l	(dp/dz) _v	(dp/dz) _{lo}	(dp/dz) _{vo}
0,01	0,055	4759,05	276,98	0,0095	0,0194	0,4020	0,4283	0,4502	141,6025
0,10	0,150	4280,62	755,40	0,0098	0,0151	0,3340	2,4793	0,4623	110,1891
0,20	0,250	3777,02	1259,01	0,0101	0,0133	0,2683	6,0612	0,4770	96,9787
0,30	0,350	3273,42	1762,61	0,0105	0,0122	0,2089	10,9215	0,4943	89,1547
0,40	0,450	2769,82	2266,21	0,0109	0,0114	0,1559	16,9544	0,5154	83,7256
0,50	0,550	2266,21	2769,82	0,0071	0,0109	0,0676	24,0877	0,3338	79,6289
0,60	0,650	1762,61	3273,42	0,0091	0,0049	0,0526	15,1009	0,4291	35,7417
0,70	0,750	1259,01	3777,02	0,0127	0,0042	0,0375	17,4241	0,6008	30,9761
0,80	0,850	755,40	4280,62	0,0212	0,0037	0,0225	19,7473	1,0013	27,3319
0,90	0,945	276,98	4759,05	0,0578	0,0034	0,0083	21,9543	2,7307	24,5842
0,99									

Usporedba pada tlaka za Shell&Tube izmjenjivač-3.4.2 Homogeni model								
Sadržaj pare	Srednji sadržaj pare	Srednja gustoća	Srednja dinamička viskoznost	Reynoldsov broj	Faktor otpora	Jedinični pad tlaka kapljevine	Udaljenost između dviju koordinata sadržaja pare	Pad taka
x [kg/kg]	\bar{x} [kg/kg]	ρ[kg/m³]	μ[Pas]	Re [-]	f _H [-]	(dp/dz) _H	ΔL[m]	Δp[m]
0,01	0,055	49,434	5,7822E-05	7184,55	0,00858	1,917	0,808	1,55
0,10	0,150	19,427	3,8127E-05	10895,63	0,00773	4,396	0,716	3,15
0,20	0,250	11,854	2,8065E-05	14802,02	0,00716	6,674	0,647	4,32
0,30	0,350	8,529	2,2205E-05	18708,42	0,00675	8,748	0,605	5,29
0,40	0,450	6,660	1,8369E-05	22614,82	0,00619	10,269	0,575	5,91
0,50	0,550	5,464	1,5664E-05	26521,22	0,00600	12,126	0,553	6,70
0,60	0,650	4,631	1,3653E-05	30427,61	0,00584	13,917	0,533	7,41
0,70	0,750	4,019	1,2099E-05	34334,01	0,00570	15,654	0,509	7,97
0,80	0,850	3,550	1,0863E-05	38240,41	0,00558	17,346	0,468	8,12
0,90	0,945	3,195	9,9024E-06	41951,49	0,00547	18,916	0,314	5,94
0,99	Ukupan pad tlaka Δp[Pa]							56,35

Usporedba pada tlaka za Shell&Tube izmjenjivač-3.4.3.2. Jung & Radermacher (1989)						
Sadržaj pare	Srednji sadržaj pare	Martinellijev parametar	Dvofazni množitelj kapljevine	Jedinični pad tlaka	Udaljenost između dviju koordinata sadržaja pare	Pad taka
x [kg/kg]	\bar{x} [kg/kg]	X _{tt} [-]	φ _f ² [-]	(dp/dz)	ΔL[m]	Δp[m]
0,01	0,055	1,291	7,95	3,58	0,8076	2,89
0,10	0,150	0,476	28,50	13,18	0,7165	9,44
0,20	0,250	0,268	52,78	25,18	0,6474	16,30
0,30	0,350	0,174	76,94	38,04	0,6046	23,00
0,40	0,450	0,120	99,07	51,07	0,5752	29,37
0,50	0,550	0,083	117,41	39,18	0,5528	21,66
0,60	0,650	0,057	129,90	55,74	0,5327	29,69
0,70	0,750	0,037	133,70	80,32	0,5089	40,87
0,80	0,850	0,021	123,66	123,81	0,4680	57,95
0,90	0,945	0,008	88,16	240,73	0,3140	75,58
0,99	Ukupan pad tlaka Δp[Pa]					306,76

Usporedba pada tlaka za Shell&Tube izmjenjivač-3.4.3.1. Chisholm (1967)							
Sadržaj pare	Srednji sadržaj pare	Parametar	Chisholmov parametar	Dvofazni množitelj pare	Jedinični pad tlaka pare	Udaljenost između dviju koordinata sadržaja pare	Pad taka
x [kg/kg]	\bar{x} [kg/kg]	x ² [-]	C[-]	φ _v ² [-]	(dp/dz) _v	ΔL[m]	Δp[m]
0,01	0,06	0,94	10,00	11,63	0,43	0,81	4,02
0,10	0,15	0,13	10,00	4,81	2,48	0,72	8,54
0,20	0,25	0,04	10,00	3,15	6,06	0,65	12,35
0,30	0,35	0,02	20,00	3,78	10,92	0,60	24,99
0,40	0,45	0,01	20,00	2,93	16,95	0,58	28,54
0,50	0,55	0,00	20,00	2,06	24,09	0,55	27,46
0,60	0,65	0,00	20,00	2,18	15,10	0,53	17,56
0,70	0,75	0,00	12,00	1,56	17,42	0,51	13,82
0,80	0,85	0,00	12,00	1,41	19,75	0,47	13,00
0,90	0,95	0,00	12,00	1,23	21,95	0,31	8,50
0,99	Ukupan pad tlaka Δp[Pa]						158,79

Usporedba izmjene topline za konstuirani pločasti izmjenjivač-5.3.1.Yan et al. (1999)							
Sadržaj pare	Ekvivalentna masena brzina	Ekvivalentni Reynoldsov broj	Koeficijent prijelaza topline	Koeficijent prolaza topline	Maseni tok kondenzata	Koeficijent prolaza između dviju koordinata sadržaja pare	Potrebna površina
x [kg/kg]	G _{ekv} [kg/m ² s]	Re _{ekv} [-]	α _{vN} [W/m ² k]	k [W/m ² k]	q _m .[kg/s]	k̄ [W/m ² k]	ΔA[m ²]
0,01	38,38	1618,16	2760,80	1762,65	0,0334	1784,76	0,00625
0,02	42,32	1784,24	2870,84	1806,86	0,0331	1827,20	0,00610
0,03	46,26	1950,32	2974,88	1847,53	0,0327	1866,36	0,00597
0,04	50,20	2116,40	3073,73	1885,19	0,0324	1902,71	0,00586
0,05	54,14	2282,48	3168,03	1920,24	0,0321	1936,64	0,00576
0,06	58,07	2448,56	3258,30	1953,04	0,0317	1968,44	0,00567
0,07	62,01	2614,64	3344,96	1983,85	0,0314	1998,37	0,00558
0,08	65,95	2780,72	3428,39	2012,89	0,0311	2026,63	0,00550
0,09	69,89	2946,80	3508,87	2040,37	0,0307	2053,41	0,00543
0,10	73,83	3112,88	3586,67	2066,44	0,0304	2078,83	0,00536
0,11	77,77	3278,96	3662,02	2091,23	0,0300	2103,05	0,00530
0,12	81,71	3445,04	3735,12	2114,86	0,0297	2126,15	0,00524
0,13	85,65	3611,11	3806,13	2137,44	0,0294	2148,25	0,00519
0,14	89,59	3777,19	3875,20	2159,06	0,0290	2169,42	0,00514
0,15	93,53	3943,27	3942,48	2179,78	0,0287	2189,73	0,00509
0,16	97,46	4109,35	4008,08	2199,68	0,0284	2209,26	0,00505
0,17	101,40	4275,43	4072,10	2218,83	0,0280	2228,05	0,00500
0,18	105,34	4441,51	4134,65	2237,27	0,0277	2246,17	0,00496
0,19	109,28	4607,59	4195,82	2255,06	0,0273	2263,65	0,00493
0,20	113,22	4773,67	4255,67	2272,24	0,0270	2280,54	0,00489
0,21	117,16	4939,75	4314,29	2288,84	0,0267	2296,87	0,00485
0,22	121,10	5105,83	4371,73	2304,91	0,0263	2312,69	0,00482
0,23	125,04	5271,91	4428,07	2320,47	0,0260	2328,02	0,00479
0,24	128,98	5437,99	4483,35	2335,56	0,0257	2342,89	0,00476
0,25	132,92	5604,07	4537,62	2350,21	0,0253	2357,32	0,00473
0,26	136,85	5770,15	4590,94	2364,43	0,0250	2371,34	0,00470
0,27	140,79	5936,23	4643,35	2378,25	0,0246	2384,98	0,00468
0,28	144,73	6102,31	4694,88	2391,70	0,0243	2398,24	0,00465
0,29	148,67	6268,38	4745,58	2404,79	0,0240	2411,16	0,00462
0,30	152,61	6434,46	4795,48	2417,54	0,0236	2423,75	0,00460
0,31	156,55	6600,54	4844,61	2429,96	0,0233	2436,02	0,00458
0,32	160,49	6766,62	4893,01	2442,07	0,0230	2447,99	0,00456
0,33	164,43	6932,70	4940,69	2453,90	0,0226	2459,67	0,00453
0,34	168,37	7098,78	4987,70	2465,44	0,0223	2471,07	0,00451
0,35	172,31	7264,86	5034,05	2476,71	0,0219	2482,22	0,00449
0,36	176,24	7430,94	5079,77	2487,73	0,0216	2493,11	0,00447
0,37	180,18	7597,02	5124,89	2498,50	0,0213	2503,76	0,00445
0,38	184,12	7763,10	5169,41	2509,03	0,0209	2514,19	0,00444
0,39	188,06	7929,18	5213,37	2519,34	0,0206	2524,39	0,00442
0,40	192,00	8095,26	5256,77	2529,43	0,0203	2534,38	0,00440
0,41	195,94	8261,34	5299,65	2539,32	0,0199	2544,16	0,00438
0,42	199,88	8427,42	5342,01	2549,00	0,0196	2553,75	0,00437
0,43	203,82	8593,50	5383,87	2558,50	0,0192	2563,15	0,00435
0,44	207,76	8759,57	5425,25	2567,81	0,0189	2572,37	0,00434
0,45	211,70	8925,65	5466,17	2576,93	0,0186	2581,41	0,00432
0,46	215,63	9091,73	5506,63	2585,89	0,0182	2590,29	0,00431
0,47	219,57	9257,81	5546,64	2594,68	0,0179	2599,00	0,00429
0,48	223,51	9423,89	5586,23	2603,31	0,0176	2607,55	0,00428
0,49	227,45	9589,97	5625,41	2611,79	0,0172	2615,95	0,00426
0,50	231,39	9756,05	5664,17	2620,11	0,0169	2624,20	0,00425
0,51	235,33	9922,13	5702,55	2628,30	0,0165	2632,32	0,00424
0,52	239,27	10088,21	5740,54	2636,34	0,0162	2640,29	0,00422
0,53	243,21	10254,29	5778,15	2644,24	0,0159	2648,13	0,00421
0,54	247,15	10420,37	5815,41	2652,02	0,0155	2655,84	0,00420
0,55	251,09	10586,45	5852,31	2659,66	0,0152	2663,43	0,00419
0,56	255,02	10752,53	5888,86	2667,19	0,0149	2670,89	0,00418
0,57	258,96	10918,61	5925,07	2674,59	0,0145	2678,24	0,00416
0,58	262,90	11084,69	5960,96	2681,88	0,0142	2685,47	0,00415
0,59	266,84	11250,77	5996,53	2689,06	0,0138	2692,59	0,00414
0,60	270,78	11416,84	6031,78	2696,12	0,0135	2699,60	0,00413
0,61	274,72	11582,92	6066,72	2703,08	0,0132	2706,51	0,00412
0,62	278,66	11749,00	6101,37	2709,94	0,0128	2713,32	0,00411
0,63	282,60	11915,08	6135,72	2716,69	0,0125	2720,02	0,00410
0,64	286,54	12081,16	6169,79	2723,35	0,0122	2726,63	0,00409
0,65	290,48	12247,24	6203,58	2729,91	0,0118	2733,15	0,00408
0,66	294,41	12413,32	6237,09	2736,39	0,0115	2739,58	0,00407
0,67	298,35	12579,40	6270,34	2742,77	0,0111	2745,91	0,00406
0,68	302,29	12745,48	6303,32	2749,06	0,0108	2752,16	0,00405
0,69	306,23	12911,56	6336,05	2755,26	0,0105	2758,33	0,00404
0,70	310,17	13077,64	6368,52	2761,39	0,0101	2764,41	0,00403
0,71	314,11	13243,72	6400,75	2767,43	0,0098	2770,41	0,00403
0,72	318,05	13409,80	6432,74	2773,39	0,0095	2776,33	0,00402
0,73	321,99	13575,88	6464,49	2779,28	0,0091	2782,18	0,00401
0,74	325,93	13741,96	6496,00	2785,09	0,0088	2787,95	0,00400
0,75	329,87	13908,04	6527,29	2790,82	0,0084	2793,65	0,00399
0,76	333,80	14074,11	6558,36	2796,49	0,0081	2799,28	0,00398
0,77	337,74	14240,19	6589,21	2802,08	0,0078	2804,84	0,00398
0,78	341,68	14406,27	6619,84	2807,60	0,0074	2810,33	0,00397
0,79	345,62	14572,35	6650,26	2813,06	0,0071	2815,76	0,00396
0,80	349,56	14738,43	6680,48	2818,45	0,0068	2821,12	0,00395
0,81	353,50	14904,51	6710,49	2823,78	0,0064	2826,41	0,00395
0,82	357,44	15070,59	6740,30	2829,05	0,0061	2831,65	0,00394
0,83	361,38	15236,67	6769,91	2834,25	0,0057	2836,82	0,00393
0,84	365,32	15402,75	6799,33	2839,39	0,0054	2841,94	0,00392
0,85	369,26	15568,83	6828,56	2844,48	0,0051	2846,99	0,00392
0,86	373,20	15734,91	6857,61	2849,51	0,0047	2851,99	0,00391
0,87	377,13	15900,99	6886,47	2854,48	0,0044	2856,94	0,00390
0,88	381,07	16067,07	6915,15	2859,39	0,0041	2861,82	0,00390
0,89	385,01	16233,15	6943,65	2864,26	0,0037	2866,66	0,00389
0,90	388,95	16399,23	6971,98	2869,06	0,0034	2871,44	0,00388
0,91	392,89	16565,30	7000,14	2873,82	0,0030	2876,17	0,00388
0,92	396,83	16731,38	7028,13	2878,53	0,0027	2880,86	0,00387
0,93	400,77	16897,46	7055,95	2883,18	0,0024	2885,49	0,00386
0,94	404,71	17063,54	7083,61	2887,79	0,0020	2890,07	0,00386
0,95	408,65	17229,62	7111,11	2892,35	0,0017	2894,61	0,00385
0,96	412,59	17395,70	7138,45	2896,86	0,0014	2899,10	0,00385
0,97	416,52	17561,78	7165,63	2901,33	0,0010	2903,54	0,00384
0,98	420,46	17727,86	7192,66	2905,75	0,0007	2907,94	0,00383
0,99	424,40	17893,94	7219,54	2910,13	0,0003	Ukupna potrebna površina A[m ²]	0,43594

Usporedba izmjene topline za konstruirani pločasti izmjenjivač-5.3.2.Palmer et al. (2000)							
Sadržaj pare	Reynoldsov broj za kapljevinu	Nusseltov broj za kapljevinu	Koeficijent broj za prijelaza topline	Koeficijent prolaza topline	Maseni tok kondenzata	Koeficijent prolaza između dviju koordinata sadržaja pare	Potrebna površina
x [kg/kg]	Re _f [-]	Nu _f [-]	α _{pf} [W/m²k]	k [W/m²k]	q _{m,f} [kg/s]	κ [W/m²k]	ΔA[m²]
0,01	1437,56	170,96	2094,07	1464,87	0,0334	1463,49	0,00520
0,02	1423,04	169,42	2088,44	1462,11	0,0331	1460,72	0,00479
0,03	1408,52	167,88	2082,77	1459,33	0,0327	1457,93	0,00455
0,04	1394,00	166,34	2077,05	1456,52	0,0324	1455,11	0,00438
0,05	1379,48	164,80	2071,29	1453,69	0,0321	1452,26	0,00426
0,06	1364,96	163,25	2065,48	1450,83	0,0317	1449,38	0,00415
0,07	1350,44	161,71	2059,63	1447,94	0,0314	1446,48	0,00407
0,08	1335,92	160,16	2053,74	1445,02	0,0311	1443,55	0,00400
0,09	1321,40	158,61	2047,79	1442,07	0,0307	1440,59	0,00393
0,10	1306,87	157,06	2041,80	1439,10	0,0304	1437,60	0,00388
0,11	1292,35	155,50	2035,76	1436,10	0,0300	1434,58	0,00383
0,12	1277,83	153,95	2029,67	1433,06	0,0297	1431,53	0,00378
0,13	1263,31	152,39	2023,52	1430,00	0,0294	1428,45	0,00374
0,14	1248,79	150,83	2017,33	1426,90	0,0290	1425,34	0,00370
0,15	1234,27	149,27	2011,08	1423,77	0,0287	1422,19	0,00367
0,16	1219,75	147,70	2004,78	1420,61	0,0284	1419,01	0,00364
0,17	1205,23	146,14	1998,42	1417,41	0,0280	1415,80	0,00361
0,18	1190,71	144,57	1992,01	1414,18	0,0277	1412,55	0,00358
0,19	1176,19	143,00	1985,53	1410,92	0,0273	1409,27	0,00355
0,20	1161,67	141,43	1979,00	1407,62	0,0270	1405,95	0,00353
0,21	1147,15	139,85	1972,41	1404,28	0,0267	1402,59	0,00350
0,22	1132,62	138,28	1965,76	1400,91	0,0263	1399,20	0,00348
0,23	1118,10	136,70	1959,04	1397,49	0,0260	1395,76	0,00346
0,24	1103,58	135,12	1952,26	1394,04	0,0257	1392,29	0,00344
0,25	1089,06	133,53	1945,42	1390,54	0,0253	1388,78	0,00342
0,26	1074,54	131,95	1938,50	1387,01	0,0250	1385,22	0,00340
0,27	1060,02	130,36	1931,52	1383,43	0,0246	1381,62	0,00338
0,28	1045,50	128,77	1924,47	1379,81	0,0243	1377,97	0,00336
0,29	1030,98	127,17	1917,34	1376,14	0,0240	1374,28	0,00335
0,30	1016,46	125,58	1910,14	1372,43	0,0236	1370,55	0,00333
0,31	1001,94	123,98	1902,87	1368,67	0,0233	1366,76	0,00332
0,32	987,42	122,38	1895,51	1364,86	0,0230	1362,93	0,00330
0,33	972,90	120,78	1888,08	1361,00	0,0226	1359,05	0,00328
0,34	958,37	119,17	1880,56	1357,09	0,0223	1355,11	0,00327
0,35	943,85	117,56	1872,97	1353,13	0,0219	1351,12	0,00326
0,36	929,33	115,95	1865,28	1349,11	0,0216	1347,08	0,00324
0,37	914,81	114,34	1857,50	1345,04	0,0213	1342,98	0,00323
0,38	900,29	112,72	1849,64	1340,91	0,0209	1338,82	0,00322
0,39	885,77	111,10	1841,68	1336,72	0,0206	1334,60	0,00320
0,40	871,25	109,48	1833,62	1332,48	0,0203	1330,32	0,00319
0,41	856,73	107,85	1825,47	1328,16	0,0199	1325,98	0,00318
0,42	842,21	106,23	1817,21	1323,79	0,0196	1321,57	0,00317
0,43	827,69	104,59	1808,85	1319,34	0,0192	1317,09	0,00315
0,44	813,17	102,96	1800,38	1314,83	0,0189	1312,54	0,00314
0,45	798,65	101,32	1791,79	1310,25	0,0186	1307,92	0,00313
0,46	784,12	99,68	1783,09	1305,59	0,0182	1303,22	0,00312
0,47	769,60	98,04	1774,28	1300,86	0,0179	1298,45	0,00311
0,48	755,08	96,39	1765,34	1296,04	0,0176	1293,60	0,00310
0,49	740,56	94,74	1756,27	1291,15	0,0172	1288,66	0,00309
0,50	726,04	93,08	1747,07	1286,17	0,0169	1283,64	0,00308
0,51	711,52	91,42	1737,73	1281,10	0,0165	1278,52	0,00307
0,52	697,00	89,76	1728,25	1275,94	0,0162	1273,32	0,00306
0,53	682,48	88,09	1718,63	1270,69	0,0159	1268,02	0,00305
0,54	667,96	86,42	1708,86	1265,34	0,0155	1262,61	0,00304
0,55	653,44	84,75	1698,92	1259,89	0,0152	1257,11	0,00303
0,56	638,92	83,07	1688,83	1254,33	0,0149	1251,49	0,00302
0,57	624,40	81,39	1678,56	1248,65	0,0145	1245,76	0,00301
0,58	609,87	79,70	1668,12	1242,87	0,0142	1239,91	0,00300
0,59	595,35	78,01	1657,49	1236,96	0,0138	1233,94	0,00299
0,60	580,83	76,32	1646,67	1230,92	0,0135	1227,84	0,00298
0,61	566,31	74,62	1635,65	1224,75	0,0132	1221,60	0,00297
0,62	551,79	72,91	1624,42	1218,45	0,0128	1215,22	0,00296
0,63	537,27	71,20	1612,97	1211,99	0,0125	1208,69	0,00295
0,64	522,75	69,48	1601,30	1205,39	0,0122	1202,00	0,00294
0,65	508,23	67,76	1589,38	1198,62	0,0118	1195,15	0,00293
0,66	493,71	66,04	1577,20	1191,68	0,0115	1188,13	0,00292
0,67	479,19	64,31	1564,76	1184,57	0,0111	1180,92	0,00291
0,68	464,67	62,57	1552,05	1177,27	0,0108	1173,52	0,00290
0,69	450,15	60,83	1539,03	1169,76	0,0105	1165,91	0,00289
0,70	435,62	59,08	1525,71	1162,05	0,0101	1158,08	0,00288
0,71	421,10	57,32	1512,05	1154,11	0,0098	1150,02	0,00287
0,72	406,58	55,56	1498,04	1145,93	0,0095	1141,71	0,00286
0,73	392,06	53,79	1483,66	1137,50	0,0091	1133,15	0,00285
0,74	377,54	52,01	1468,89	1128,79	0,0088	1124,29	0,00284
0,75	363,02	50,23	1453,69	1119,79	0,0084	1115,14	0,00283
0,76	348,50	48,44	1438,03	1110,48	0,0081	1105,66	0,00282
0,77	333,98	46,64	1421,89	1100,83	0,0078	1095,82	0,00281
0,78	319,46	44,83	1405,23	1090,82	0,0074	1085,61	0,00280
0,79	304,94	43,01	1387,99	1080,41	0,0071	1074,98	0,00279
0,80	290,42	41,18	1370,15	1069,56	0,0068	1063,90	0,00278
0,81	275,90	39,34	1351,64	1058,25	0,0064	1052,33	0,00277
0,82	261,37	37,49	1332,39	1046,41	0,0061	1040,21	0,00276
0,83	246,85	35,64	1312,35	1034,01	0,0057	1027,49	0,00274
0,84	232,33	33,76	1291,41	1020,97	0,0054	1014,10	0,00273
0,85	217,81	31,88	1269,50	1007,22	0,0051	999,95	0,00272
0,86	203,29	29,98	1246,48	992,68	0,0047	984,96	0,00271
0,87	188,77	28,07	1222,22	977,23	0,0044	968,99	0,00270
0,88	174,25	26,14	1196,55	960,75	0,0041	951,91	0,00268
0,89	159,73	24,19	1169,25	943,07	0,0037	933,53	0,00267
0,90	145,21	22,22	1140,06	923,99	0,0034	913,62	0,00265
0,91	130,69	20,23	1108,65	903,25	0,0030	891,87	0,00264
0,92	116,17	18,22	1074,55	880,49	0,0027	867,85	0,00262
0,93	101,65	16,18	1037,16	855,22	0,0024	841,00	0,00261
0,94	87,12	14,10	995,61	826,77	0,0020	810,44	0,00259
0,95	72,60	11,99	948,61	794,10	0,0017	774,82	0,00256
0,96	58,08	9,83	894,10	755,54	0,0014	731,82	0,00254
0,97	43,56	7,61	828,42	708,10	0,0010	676,78	0,00251
0,98	29,04	5,31	743,96	645,46	0,0007	597,37	0,00247
0,99	14,52	2,86	619,03	549,28	0,0003	Ukupna potrebna površina A[m²]	0,31308

Usporedba izmjene topline za konstruirani pločasti izmjenjivač-5.3.3.Thonon & Bontemps (2002)									
Sadržaj pare	Ekvivalentna masena brzina	Ekvivalentni Reynoldsov broj	Reynoldsov broj za samo kapljevinu	Koeficijent prijelaza topline za samo kapljevinu	Koeficijent prijelaza topline	Koeficijent prolaza topline	Maseni tok kondenzata	Koeficijent prolaza između dviju koordinata sadržaja pare	Potrebna površina
x [kg/kg]	G _{ekv} [kg/m ² s]	Re _{ekv} [-]	Re _{io} [-]	α _{ig} [W/m ² k]	α _{tg} [W/m ² k]	k [W/m ² k]	q _{m,l} [kg/s]	κ̄ [W/m ² k]	ΔA[m ²]
0,01	38,38	1618,16	1452,08	1405,56	8002,59	3029,62	0,0334	2986,67	0,00373
0,02	42,32	1784,24	1452,08	1405,56	7429,89	2943,72	0,0331	2904,01	0,00384
0,03	46,26	1950,32	1452,08	1405,56	6943,95	2864,31	0,0327	2827,43	0,00394
0,04	50,20	2116,40	1452,08	1405,56	6525,79	2790,55	0,0324	2756,16	0,00405
0,05	54,14	2282,48	1452,08	1405,56	6161,66	2721,77	0,0321	2689,59	0,00415
0,06	58,07	2448,56	1452,08	1405,56	5841,38	2657,40	0,0317	2627,19	0,00424
0,07	62,01	2614,64	1452,08	1405,56	5557,18	2596,98	0,0314	2568,55	0,00434
0,08	65,95	2780,72	1452,08	1405,56	5303,08	2540,11	0,0311	2513,27	0,00444
0,09	69,89	2946,80	1452,08	1405,56	5074,36	2486,43	0,0307	2461,03	0,00453
0,10	73,83	3112,88	1452,08	1405,56	4867,26	2435,64	0,0304	2411,57	0,00462
0,11	77,77	3278,96	1452,08	1405,56	4678,73	2387,50	0,0300	2364,64	0,00472
0,12	81,71	3445,04	1452,08	1405,56	4506,30	2341,78	0,0297	2320,02	0,00481
0,13	85,65	3611,11	1452,08	1405,56	4347,90	2298,27	0,0294	2277,53	0,00490
0,14	89,59	3777,19	1452,08	1405,56	4201,83	2256,80	0,0290	2237,00	0,00498
0,15	93,53	3943,27	1452,08	1405,56	4066,64	2217,21	0,0287	2198,29	0,00507
0,16	97,46	4109,35	1452,08	1405,56	3941,12	2179,36	0,0284	2161,25	0,00516
0,17	101,40	4275,43	1452,08	1405,56	3824,22	2143,14	0,0280	2125,77	0,00525
0,18	105,34	4441,51	1452,08	1405,56	3715,04	2108,41	0,0277	2091,75	0,00533
0,19	109,28	4607,59	1452,08	1405,56	3612,83	2075,09	0,0273	2059,09	0,00542
0,20	113,22	4773,67	1452,08	1405,56	3516,89	2043,08	0,0270	2027,69	0,00550
0,21	117,16	4939,75	1452,08	1405,56	3426,66	2012,30	0,0267	1997,48	0,00558
0,22	121,10	5105,83	1452,08	1405,56	3341,62	1982,67	0,0263	1968,39	0,00567
0,23	125,04	5271,91	1452,08	1405,56	3261,31	1954,12	0,0260	1940,35	0,00575
0,24	128,98	5437,99	1452,08	1405,56	3185,33	1926,58	0,0257	1913,29	0,00583
0,25	132,92	5604,07	1452,08	1405,56	3113,33	1900,01	0,0253	1887,17	0,00591
0,26	136,85	5770,15	1452,08	1405,56	3044,99	1874,33	0,0250	1861,92	0,00599
0,27	140,79	5936,23	1452,08	1405,56	2980,02	1849,51	0,0246	1837,51	0,00607
0,28	144,73	6102,31	1452,08	1405,56	2918,18	1825,50	0,0243	1813,88	0,00615
0,29	148,67	6268,38	1452,08	1405,56	2859,23	1802,26	0,0240	1791,00	0,00623
0,30	152,61	6434,46	1452,08	1405,56	2802,97	1779,74	0,0236	1768,83	0,00630
0,31	156,55	6600,54	1452,08	1405,56	2749,20	1757,91	0,0233	1747,33	0,00638
0,32	160,49	6766,62	1452,08	1405,56	2697,77	1736,74	0,0230	1726,47	0,00646
0,33	164,43	6932,70	1452,08	1405,56	2648,51	1716,19	0,0226	1706,21	0,00654
0,34	168,37	7098,78	1452,08	1405,56	2601,28	1696,24	0,0223	1686,54	0,00661
0,35	172,31	7264,86	1452,08	1405,56	2555,96	1676,85	0,0219	1667,43	0,00669
0,36	176,24	7430,94	1452,08	1405,56	2512,43	1658,00	0,0216	1648,84	0,00676
0,37	180,18	7597,02	1452,08	1405,56	2470,58	1639,67	0,0213	1630,75	0,00684
0,38	184,12	7763,10	1452,08	1405,56	2430,30	1621,83	0,0209	1613,15	0,00691
0,39	188,06	7929,18	1452,08	1405,56	2391,52	1604,47	0,0206	1596,01	0,00699
0,40	192,00	8095,26	1452,08	1405,56	2354,14	1587,56	0,0203	1579,32	0,00706
0,41	195,94	8261,34	1452,08	1405,56	2318,08	1571,08	0,0199	1563,05	0,00713
0,42	199,88	8427,42	1452,08	1405,56	2283,28	1555,01	0,0196	1547,18	0,00721
0,43	203,82	8593,50	1452,08	1405,56	2249,67	1539,35	0,0192	1531,71	0,00728
0,44	207,76	8759,57	1452,08	1405,56	2217,18	1524,07	0,0189	1516,61	0,00735
0,45	211,70	8925,65	1452,08	1405,56	2185,75	1509,15	0,0186	1501,87	0,00742
0,46	215,63	9091,73	1452,08	1405,56	2155,34	1494,59	0,0182	1487,48	0,00750
0,47	219,57	9257,81	1452,08	1405,56	2125,89	1480,37	0,0179	1473,43	0,00757
0,48	223,51	9423,89	1452,08	1405,56	2097,36	1466,48	0,0176	1459,69	0,00764
0,49	227,45	9589,97	1452,08	1405,56	2069,69	1452,90	0,0172	1446,26	0,00771
0,50	231,39	9756,05	1452,08	1405,56	2042,86	1439,63	0,0169	1433,14	0,00778
0,51	235,33	9922,13	1452,08	1405,56	2016,82	1426,65	0,0165	1420,30	0,00785
0,52	239,27	10088,21	1452,08	1405,56	1991,54	1413,95	0,0162	1407,74	0,00792
0,53	243,21	10254,29	1452,08	1405,56	1966,98	1401,52	0,0159	1395,44	0,00799
0,54	247,15	10420,37	1452,08	1405,56	1943,10	1389,36	0,0155	1383,41	0,00806
0,55	251,09	10586,45	1452,08	1405,56	1919,89	1377,45	0,0152	1371,62	0,00813
0,56	255,02	10752,53	1452,08	1405,56	1897,31	1365,79	0,0149	1360,08	0,00820
0,57	258,96	10918,61	1452,08	1405,56	1875,34	1354,37	0,0145	1348,77	0,00827
0,58	262,90	11084,69	1452,08	1405,56	1853,95	1343,18	0,0142	1337,69	0,00834
0,59	266,84	11250,77	1452,08	1405,56	1833,11	1332,21	0,0138	1326,83	0,00840
0,60	270,78	11416,84	1452,08	1405,56	1812,81	1321,45	0,0135	1316,18	0,00847
0,61	274,72	11582,92	1452,08	1405,56	1793,02	1310,90	0,0132	1305,73	0,00854
0,62	278,66	11749,00	1452,08	1405,56	1773,73	1300,56	0,0128	1295,49	0,00861
0,63	282,60	11915,08	1452,08	1405,56	1754,90	1290,41	0,0125	1285,43	0,00868
0,64	286,54	12081,16	1452,08	1405,56	1736,54	1280,45	0,0122	1275,57	0,00874
0,65	290,48	12247,24	1452,08	1405,56	1718,61	1270,68	0,0118	1265,88	0,00881
0,66	294,41	12413,32	1452,08	1405,56	1701,11	1261,09	0,0115	1256,38	0,00888
0,67	298,35	12579,40	1452,08	1405,56	1684,01	1251,67	0,0111	1247,04	0,00894
0,68	302,29	12745,48	1452,08	1405,56	1667,31	1242,42	0,0108	1237,87	0,00901
0,69	306,23	12911,56	1452,08	1405,56	1650,99	1233,33	0,0105	1228,87	0,00907
0,70	310,17	13077,64	1452,08	1405,56	1635,03	1224,40	0,0101	1220,02	0,00914
0,71	314,11	13243,72	1452,08	1405,56	1619,42	1215,63	0,0098	1211,32	0,00921
0,72	318,05	13409,80	1452,08	1405,56	1604,15	1207,01	0,0095	1202,77	0,00927
0,73	321,99	13575,88	1452,08	1405,56	1589,22	1198,53	0,0091	1194,36	0,00934
0,74	325,93	13741,96	1452,08	1405,56	1574,60	1190,20	0,0088	1186,10	0,00940
0,75	329,87	13908,04	1452,08	1405,56	1560,29	1182,00	0,0084	1177,97	0,00947
0,76	333,80	14074,11	1452,08	1405,56	1546,28	1173,94	0,0081	1169,98	0,00953
0,77	337,74	14240,19	1452,08	1405,56	1532,55	1166,02	0,0078	1162,12	0,00960
0,78	341,68	14406,27	1452,08	1405,56	1519,11	1158,22	0,0074	1154,38	0,00966
0,79	345,62	14572,35	1452,08	1405,56	1505,93	1150,54	0,0071	1146,76	0,00972
0,80	349,56	14738,43	1452,08	1405,56	1493,02	1142,99	0,0068	1139,27	0,00979
0,81	353,50	14904,51	1452,08	1405,56	1480,35	1135,55	0,0064	1131,89	0,00985
0,82	357,44	15070,59	1452,08	1405,56	1467,94	1128,23	0,0061	1124,63	0,00992
0,83	361,38	15236,67	1452,08	1405,56	1455,76	1121,03	0,0057	1117,48	0,00998
0,84	365,32	15402,75	1452,08	1405,56	1443,82	1113,93	0,0054	1110,44	0,01004
0,85	369,26	15568,83	1452,08	1405,56	1432,10	1106,94	0,0051	1103,50	0,01011
0,86	373,20	15734,91	1452,08	1405,56	1420,60	1100,06	0,0047	1096,66	0,01017
0,87	377,13	15900,99	1452,08	1405,56	1409,30	1093,27	0,0044	1089,93	0,01023
0,88	381,07	16067,07	1452,08	1405,56	1398,22	1086,59	0,0041	1083,30	0,01029
0,89	385,01	16233,15	1452,08	1405,56	1387,33	1080,01	0,0037	1076,76	0,01036
0,90	388,95	16399,23	1452,08	1405,56	1376,64	1073,52	0,0034	1070,32	0,01042
0,91	392,89	16565,30	1452,08	1405,56	1366,14	1067,12	0,0030	1063,97	0,01048
0,92	396,83	16731,38	1452,08	1405,56	1355,82	1060,81	0,0027	1057,70	0,01054
0,93	400,77	16897,46	1452,08	1405,56	1345,68	1054,59	0,0024	1051,53	0,01060
0,94	404,71	17063,54	1452,08	1405,56	1335,72	1048,46	0,0020	1045,44	0,01067
0,95	408,65	17229,62	1452,08	1405,56	1325,92	1042,42	0,0017	1039,44	0,01073
0,96	412,59	17395,70	1452,08	1405,56	1316,29	1036,46	0,0014	1033,52	0,01079
0,97	416,52	17561,78	1452,08	1405,56	1306,82	1030,58	0,0010	1027,67	0,01085
0,98	420,46	17727,86	1452,08	1405,56	1297,50	1024,77	0,0007	1021,91	0,01091
0,99	424,40	17893,94	1452,08	1405,56	1288,34	1019,05	0,0003	Ukupna potrebna površina A[m ²]	0,74629

Usporedba izmjene topline za konstruirani pločasti izmjenjivač-5.3.4. Han et al. (2003)							
Sadržaj pare	Ekvivalentna masena brzina	Ekvivalentni Reynoldsov broj	Koeficijent prijelaza topline	Koeficijent prolaza topline	Maseni tok kondenzata	Koeficijent prolaza između dviju koordinata sadržaja pare	Potrebna površina
x [kg/kg]	G _{ekv} [kg/m ² s]	Re _{ekv} [-]	α _{tH} [W/m ² k]	k [W/m ² k]	q _m [kg/s]	κ [W/m ² k]	ΔA[m ²]
0,01	38,38	1618,16	3737,11	2115,50	0,0334	2138,20	0,00522
0,02	42,32	1784,24	3881,11	2160,89	0,0331	2181,64	0,00511
0,03	46,26	1950,32	4017,10	2202,40	0,0327	2221,52	0,00502
0,04	50,20	2116,40	4146,17	2240,64	0,0324	2258,36	0,00494
0,05	54,14	2282,48	4269,17	2276,08	0,0321	2292,58	0,00486
0,06	58,07	2448,56	4386,80	2309,09	0,0317	2324,53	0,00480
0,07	62,01	2614,64	4499,63	2339,97	0,0314	2354,48	0,00474
0,08	65,95	2780,72	4608,15	2368,99	0,0311	2382,66	0,00468
0,09	69,89	2946,80	4712,76	2396,33	0,0307	2409,26	0,00463
0,10	73,83	3112,88	4813,82	2422,19	0,0304	2434,45	0,00458
0,11	77,77	3278,96	4911,62	2446,70	0,0300	2458,36	0,00454
0,12	81,71	3445,04	5006,44	2470,01	0,0297	2481,11	0,00449
0,13	85,65	3611,11	5098,49	2492,21	0,0294	2502,80	0,00446
0,14	89,59	3777,19	5187,98	2513,40	0,0290	2523,53	0,00442
0,15	93,53	3943,27	5275,09	2533,67	0,0287	2543,38	0,00438
0,16	97,46	4109,35	5359,98	2553,09	0,0284	2562,41	0,00435
0,17	101,40	4275,43	5442,79	2571,73	0,0280	2580,68	0,00432
0,18	105,34	4441,51	5523,65	2589,64	0,0277	2598,26	0,00429
0,19	109,28	4607,59	5602,68	2606,88	0,0273	2615,18	0,00426
0,20	113,22	4773,67	5679,98	2623,49	0,0270	2631,51	0,00424
0,21	117,16	4939,75	5755,65	2639,52	0,0267	2647,26	0,00421
0,22	121,10	5105,83	5829,77	2655,00	0,0263	2662,48	0,00419
0,23	125,04	5271,91	5902,43	2669,97	0,0260	2677,21	0,00417
0,24	128,98	5437,99	5973,70	2684,46	0,0257	2691,47	0,00414
0,25	132,92	5604,07	6043,65	2698,49	0,0253	2705,30	0,00412
0,26	136,85	5770,15	6112,34	2712,10	0,0250	2718,70	0,00410
0,27	140,79	5936,23	6179,83	2725,31	0,0246	2731,72	0,00408
0,28	144,73	6102,31	6246,17	2738,13	0,0243	2744,36	0,00406
0,29	148,67	6268,38	6311,41	2750,60	0,0240	2756,66	0,00405
0,30	152,61	6434,46	6375,60	2762,72	0,0236	2768,62	0,00403
0,31	156,55	6600,54	6438,79	2774,52	0,0233	2780,26	0,00401
0,32	160,49	6766,62	6501,00	2786,00	0,0230	2791,60	0,00399
0,33	164,43	6932,70	6562,29	2797,20	0,0226	2802,66	0,00398
0,34	168,37	7098,78	6622,68	2808,12	0,0223	2813,44	0,00396
0,35	172,31	7264,86	6682,22	2818,76	0,0219	2823,96	0,00395
0,36	176,24	7430,94	6740,92	2829,16	0,0216	2834,23	0,00393
0,37	180,18	7597,02	6798,83	2839,31	0,0213	2844,26	0,00392
0,38	184,12	7763,10	6855,96	2849,22	0,0209	2854,07	0,00391
0,39	188,06	7929,18	6912,35	2858,91	0,0206	2863,65	0,00389
0,40	192,00	8095,26	6968,02	2868,39	0,0203	2873,03	0,00388
0,41	195,94	8261,34	7022,99	2877,67	0,0199	2882,20	0,00387
0,42	199,88	8427,42	7077,30	2886,74	0,0196	2891,18	0,00386
0,43	203,82	8593,50	7130,95	2895,63	0,0192	2899,98	0,00385
0,44	207,76	8759,57	7183,96	2904,33	0,0189	2908,59	0,00383
0,45	211,70	8925,65	7236,37	2912,86	0,0186	2917,04	0,00382
0,46	215,63	9091,73	7288,18	2921,22	0,0182	2925,32	0,00381
0,47	219,57	9257,81	7339,41	2929,41	0,0179	2933,43	0,00380
0,48	223,51	9423,89	7390,08	2937,45	0,0176	2941,40	0,00379
0,49	227,45	9589,97	7440,21	2945,34	0,0172	2949,21	0,00378
0,50	231,39	9756,05	7489,81	2953,08	0,0169	2956,88	0,00377
0,51	235,33	9922,13	7538,89	2960,68	0,0165	2964,41	0,00376
0,52	239,27	10088,21	7587,48	2968,15	0,0162	2971,81	0,00375
0,53	243,21	10254,29	7635,57	2975,48	0,0159	2979,08	0,00374
0,54	247,15	10420,37	7683,19	2982,68	0,0155	2986,22	0,00373
0,55	251,09	10586,45	7730,35	2989,76	0,0152	2993,24	0,00373
0,56	255,02	10752,53	7777,05	2996,72	0,0149	3000,14	0,00372
0,57	258,96	10918,61	7823,32	3003,57	0,0145	3006,93	0,00371
0,58	262,90	11084,69	7869,16	3010,30	0,0142	3013,61	0,00370
0,59	266,84	11250,77	7914,57	3016,92	0,0138	3020,18	0,00369
0,60	270,78	11416,84	7959,58	3023,44	0,0135	3026,65	0,00368
0,61	274,72	11582,92	8004,19	3029,85	0,0132	3033,01	0,00368
0,62	278,66	11749,00	8048,41	3036,17	0,0128	3039,28	0,00367
0,63	282,60	11915,08	8092,24	3042,38	0,0125	3045,45	0,00366
0,64	286,54	12081,16	8135,70	3048,51	0,0122	3051,52	0,00365
0,65	290,48	12247,24	8178,80	3054,54	0,0118	3057,51	0,00365
0,66	294,41	12413,32	8221,54	3060,48	0,0115	3063,41	0,00364
0,67	298,35	12579,40	8263,94	3066,34	0,0111	3069,22	0,00363
0,68	302,29	12745,48	8305,99	3072,11	0,0108	3074,95	0,00363
0,69	306,23	12911,56	8347,70	3077,80	0,0105	3080,60	0,00362
0,70	310,17	13077,64	8389,09	3083,40	0,0101	3086,17	0,00361
0,71	314,11	13243,72	8430,16	3088,93	0,0098	3091,66	0,00361
0,72	318,05	13409,80	8470,91	3094,39	0,0095	3097,08	0,00360
0,73	321,99	13575,88	8511,36	3099,77	0,0091	3102,42	0,00359
0,74	325,93	13741,96	8551,50	3105,08	0,0088	3107,70	0,00359
0,75	329,87	13908,04	8591,35	3110,32	0,0084	3112,90	0,00358
0,76	333,80	14074,11	8630,90	3115,49	0,0081	3118,04	0,00358
0,77	337,74	14240,19	8670,17	3120,59	0,0078	3123,11	0,00357
0,78	341,68	14406,27	8709,16	3125,62	0,0074	3128,11	0,00356
0,79	345,62	14572,35	8747,88	3130,60	0,0071	3133,05	0,00356
0,80	349,56	14738,43	8786,32	3135,51	0,0068	3137,93	0,00355
0,81	353,50	14904,51	8824,51	3140,36	0,0064	3142,75	0,00355
0,82	357,44	15070,59	8862,43	3145,14	0,0061	3147,51	0,00354
0,83	361,38	15236,67	8900,09	3149,88	0,0057	3152,21	0,00354
0,84	365,32	15402,75	8937,51	3154,55	0,0054	3156,86	0,00353
0,85	369,26	15568,83	8974,68	3159,17	0,0051	3161,45	0,00353
0,86	373,20	15734,91	9011,61	3163,73	0,0047	3165,99	0,00352
0,87	377,13	15900,99	9048,30	3168,24	0,0044	3170,47	0,00352
0,88	381,07	16067,07	9084,75	3172,70	0,0041	3174,90	0,00351
0,89	385,01	16233,15	9120,97	3177,11	0,0037	3179,28	0,00351
0,90	388,95	16399,23	9156,97	3181,46	0,0034	3183,62	0,00350
0,91	392,89	16565,30	9192,75	3185,77	0,0030	3187,90	0,00350
0,92	396,83	16731,38	9228,30	3190,03	0,0027	3192,14	0,00349
0,93	400,77	16897,46	9263,64	3194,24	0,0024	3196,32	0,00349
0,94	404,71	17063,54	9298,77	3198,41	0,0020	3200,47	0,00348
0,95	408,65	17229,62	9333,69	3202,53	0,0017	3204,57	0,00348
0,96	412,59	17395,70	9368,40	3206,61	0,0014	3208,62	0,00348
0,97	416,52	17561,78	9402,91	3210,64	0,0010	3212,63	0,00347
0,98	420,46	17727,86	9437,22	3214,63	0,0007	3216,60	0,00347
0,99	424,40	17893,94	9471,34	3218,58	0,0003	Ukupna potrebna površina A[m ²]	0,38366

Usporedba izmjene topline za konstruirani pločasti izmjenjivač-5.3.5. Wurfel & Ostrowski (2003)							
Sadržaj pare	Ekvivalentna masena brzina	Ekvivalentni Reynoldsov broj	Koeficijent prijelaza topline	Koeficijent prolaza topline	Maseni tok kondenzata	Koeficijent prolaza između dviju koordinata sadržaja pare	Potrebna površina
x [kg/kg]	G _{ekv} [kg/m²s]	Re _{ekv} [-]	α _{WO} [W/m²k]	k [W/m²k]	q _{m,i} [kg/s]	k̄ [W/m²k]	ΔA[m²]
0,01	34,79	1466,97	3154,72	1915,34	0,0334	1939,88	0,00575
0,02	35,15	1481,86	3290,08	1964,41	0,0331	1986,94	0,00561
0,03	35,50	1496,75	3418,44	2009,46	0,0327	2030,28	0,00549
0,04	35,85	1511,64	3540,70	2051,09	0,0324	2070,44	0,00539
0,05	36,21	1526,54	3657,61	2089,79	0,0321	2107,86	0,00529
0,06	36,56	1541,43	3769,76	2125,92	0,0317	2142,87	0,00520
0,07	36,91	1556,32	3877,65	2159,82	0,0314	2175,77	0,00513
0,08	37,27	1571,21	3981,71	2191,72	0,0311	2206,78	0,00505
0,09	37,62	1586,10	4082,28	2221,85	0,0307	2236,12	0,00499
0,10	37,97	1600,99	4179,67	2250,39	0,0304	2263,94	0,00493
0,11	38,32	1615,88	4274,13	2277,49	0,0300	2290,39	0,00487
0,12	38,68	1630,77	4365,91	2303,29	0,0297	2315,60	0,00482
0,13	39,03	1645,66	4455,20	2327,90	0,0294	2339,67	0,00477
0,14	39,38	1660,55	4542,18	2351,43	0,0290	2362,70	0,00472
0,15	39,74	1675,44	4627,01	2373,96	0,0287	2384,77	0,00468
0,16	40,09	1690,33	4709,82	2395,57	0,0284	2405,95	0,00463
0,17	40,44	1705,22	4790,75	2416,33	0,0280	2426,32	0,00460
0,18	40,80	1720,11	4869,90	2436,31	0,0277	2445,93	0,00456
0,19	41,15	1735,00	4947,38	2455,55	0,0273	2464,82	0,00452
0,20	41,50	1749,89	5023,29	2474,10	0,0270	2483,06	0,00449
0,21	41,86	1764,78	5097,71	2492,02	0,0267	2500,68	0,00446
0,22	42,21	1779,67	5170,71	2509,34	0,0263	2517,72	0,00443
0,23	42,56	1794,56	5242,37	2526,10	0,0260	2534,21	0,00440
0,24	42,92	1809,46	5312,76	2542,33	0,0257	2550,19	0,00437
0,25	43,27	1824,35	5381,93	2558,06	0,0253	2565,69	0,00435
0,26	43,62	1839,24	5449,95	2573,32	0,0250	2580,73	0,00432
0,27	43,98	1854,13	5516,85	2588,14	0,0246	2595,34	0,00430
0,28	44,33	1869,02	5582,70	2602,54	0,0243	2609,55	0,00427
0,29	44,68	1883,91	5647,53	2616,55	0,0240	2623,36	0,00425
0,30	45,04	1898,80	5711,40	2630,17	0,0236	2636,81	0,00423
0,31	45,39	1913,69	5774,32	2643,44	0,0233	2649,90	0,00421
0,32	45,74	1928,58	5836,36	2656,37	0,0230	2662,67	0,00419
0,33	46,09	1943,47	5897,53	2668,97	0,0226	2675,11	0,00417
0,34	46,45	1958,36	5957,87	2681,25	0,0223	2687,25	0,00415
0,35	46,80	1973,25	6017,41	2693,25	0,0219	2699,10	0,00413
0,36	47,15	1988,14	6076,18	2704,96	0,0216	2710,68	0,00411
0,37	47,51	2003,03	6134,21	2716,40	0,0213	2721,99	0,00410
0,38	47,86	2017,92	6191,52	2727,58	0,0209	2733,04	0,00408
0,39	48,21	2032,81	6248,13	2738,51	0,0206	2743,85	0,00406
0,40	48,57	2047,70	6304,07	2749,20	0,0203	2754,43	0,00405
0,41	48,92	2062,59	6359,36	2759,66	0,0199	2764,79	0,00403
0,42	49,27	2077,48	6414,02	2769,91	0,0196	2774,92	0,00402
0,43	49,63	2092,38	6468,07	2779,94	0,0192	2784,85	0,00400
0,44	49,98	2107,27	6521,53	2789,77	0,0189	2794,58	0,00399
0,45	50,33	2122,16	6574,42	2799,40	0,0186	2804,12	0,00398
0,46	50,69	2137,05	6626,74	2808,85	0,0182	2813,48	0,00396
0,47	51,04	2151,94	6678,52	2818,11	0,0179	2822,65	0,00395
0,48	51,39	2166,83	6729,78	2827,19	0,0176	2831,65	0,00394
0,49	51,75	2181,72	6780,53	2836,11	0,0172	2840,49	0,00393
0,50	52,10	2196,61	6830,77	2844,86	0,0169	2849,16	0,00391
0,51	52,45	2211,50	6880,53	2853,46	0,0165	2857,68	0,00390
0,52	52,80	2226,39	6929,82	2861,90	0,0162	2866,05	0,00389
0,53	53,16	2241,28	6978,65	2870,19	0,0159	2874,27	0,00388
0,54	53,51	2256,17	7027,03	2878,34	0,0155	2882,35	0,00387
0,55	53,86	2271,06	7074,97	2886,35	0,0152	2890,29	0,00386
0,56	54,22	2285,95	7122,48	2894,23	0,0149	2898,10	0,00385
0,57	54,57	2300,84	7169,58	2901,98	0,0145	2905,79	0,00384
0,58	54,92	2315,73	7216,27	2909,60	0,0142	2913,35	0,00383
0,59	55,28	2330,62	7262,57	2917,09	0,0138	2920,78	0,00382
0,60	55,63	2345,51	7308,47	2924,47	0,0135	2928,10	0,00381
0,61	55,98	2360,40	7354,00	2931,74	0,0132	2935,31	0,00380
0,62	56,34	2375,30	7399,16	2938,89	0,0128	2942,41	0,00379
0,63	56,69	2390,19	7443,95	2945,93	0,0125	2949,39	0,00378
0,64	57,04	2405,08	7488,39	2952,86	0,0122	2956,28	0,00377
0,65	57,40	2419,97	7532,49	2959,69	0,0118	2963,06	0,00376
0,66	57,75	2434,86	7576,24	2966,43	0,0115	2969,74	0,00375
0,67	58,10	2449,75	7619,66	2973,06	0,0111	2976,33	0,00375
0,68	58,46	2464,64	7662,76	2979,60	0,0108	2982,82	0,00374
0,69	58,81	2479,53	7705,53	2986,04	0,0105	2989,22	0,00373
0,70	59,16	2494,42	7748,00	2992,40	0,0101	2995,53	0,00372
0,71	59,51	2509,31	7790,16	2998,67	0,0098	3001,76	0,00371
0,72	59,87	2524,20	7832,01	3004,85	0,0095	3007,90	0,00371
0,73	60,22	2539,09	7873,58	3010,95	0,0091	3013,95	0,00370
0,74	60,57	2553,98	7914,85	3016,96	0,0088	3019,93	0,00369
0,75	60,93	2568,87	7955,84	3022,90	0,0084	3025,83	0,00369
0,76	61,28	2583,76	7996,56	3028,76	0,0081	3031,65	0,00368
0,77	61,63	2598,65	8037,00	3034,54	0,0078	3037,40	0,00367
0,78	61,99	2613,54	8077,17	3040,25	0,0074	3043,07	0,00366
0,79	62,34	2628,43	8117,08	3045,89	0,0071	3048,67	0,00366
0,80	62,69	2643,32	8156,73	3051,45	0,0068	3054,20	0,00365
0,81	63,05	2658,21	8196,12	3056,95	0,0064	3059,67	0,00364
0,82	63,40	2673,11	8235,27	3062,38	0,0061	3065,06	0,00364
0,83	63,75	2688,00	8274,17	3067,74	0,0057	3070,39	0,00363
0,84	64,11	2702,89	8312,83	3073,04	0,0054	3075,66	0,00363
0,85	64,46	2717,78	8351,26	3078,28	0,0051	3080,87	0,00362
0,86	64,81	2732,67	8389,45	3083,45	0,0047	3086,01	0,00361
0,87	65,17	2747,56	8427,41	3088,57	0,0044	3091,09	0,00361
0,88	65,52	2762,45	8465,15	3093,62	0,0041	3096,12	0,00360
0,89	65,87	2777,34	8502,67	3098,62	0,0037	3101,09	0,00360
0,90	66,23	2792,23	8539,96	3103,56	0,0034	3106,00	0,00359
0,91	66,58	2807,12	8577,04	3108,44	0,0030	3110,85	0,00358
0,92	66,93	2822,01	8613,92	3113,27	0,0027	3115,66	0,00358
0,93	67,28	2836,90	8650,58	3118,05	0,0024	3120,41	0,00357
0,94	67,64	2851,79	8687,04	3122,77	0,0020	3125,11	0,00357
0,95	67,99	2866,68	8723,29	3127,44	0,0017	3129,75	0,00356
0,96	68,34	2881,57	8759,35	3132,06	0,0014	3134,35	0,00356
0,97	68,70	2896,46	8795,21	3136,64	0,0010	3138,90	0,00355
0,98	69,05	2911,35	8830,88	3141,16	0,0007	3143,40	0,00355
0,99	69,40	2926,24	8866,36	3145,64	0,0003	Ukupna potrebna površina A[m²]	0,00709

Sadržaj pare	Ekvivalentna masena brzina	Ekvivalentni Reynoldsov broj	Koeficijent prijelaza topline	Koeficijent prolaza topline	Maseni tok kondenzata	Koeficijent prolaza između dviju koordinata sadržaja pare	Potrebna površina
x [kg/kg]	$G_{ekv} [kg/m^2s]$	$Re_{ekv} [-]$	$\alpha_{YN} [W/m^2k]$	k [W/m ² k]	$q_{m,l} [kg/s]$	$\bar{k} [W/m^2k]$	$\Delta A [m^2]$
0,01	38,38	1618,213	2760,839	1762,664	0,03341	1914,559	0,052
0,10	73,83	3112,973	3586,717	2066,454	0,03038	2169,353	0,051
0,20	113,22	4773,818	4255,722	2272,252	0,02700	2344,902	0,048
0,30	152,62	6434,663	4795,537	2417,552	0,02363	2473,502	0,045
0,40	192,01	8095,509	5256,838	2529,451	0,02025	2574,791	0,043
0,50	231,40	9756,354	5664,244	2620,131	0,01688	2658,135	0,042
0,60	270,79	11417,199	6031,853	2696,139	0,01350	2728,771	0,041
0,70	310,18	13078,044	6368,601	2761,404	0,01013	2789,937	0,040
0,80	349,57	14738,889	6680,559	2818,471	0,00675	2843,775	0,039
0,90	388,96	16399,735	6972,068	2869,080	0,00338	2889,612	0,035
0,99	424,42	17894,495	7219,626	2910,144	0,00034	Ukupna potrebna površina L[m]	0,437

Usporedba pada tlaka za pločasti izmjenjivač- 5.4.1. Yan et al. (1999)

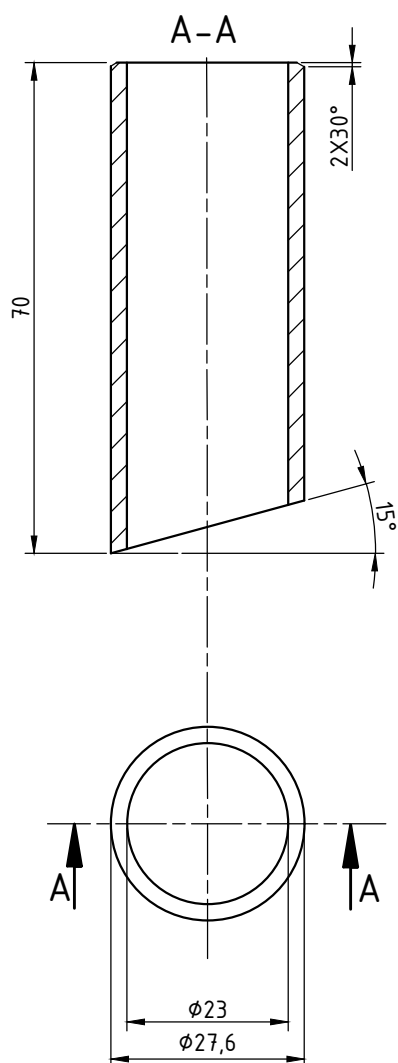
Sadržaj pare	Srednji sadržaj pare	Ekvivalentna masena brzina	Ekvivalentni Reynoldsov broj	Faktor otpora	Udaljenost između dviju koordinata sadržaja pare	Srednja gustoća	Pad taka
x [kg/kg]	\bar{x} [kg/kg]	G_{ekv} [kg/m ² s]	Re_{ekv} [-]	f_{LE} [-]	ΔL [m]	ρ [kg/m ³]	Δp [m]
0,01	0,055	56,11	2365,58	0,05060	0,1070	49,434	74,69
0,10	0,150	93,53	3943,39	0,04940	0,1049	19,427	181,97
0,20	0,250	132,92	5604,22	0,04860	0,0971	11,854	271,42
0,30	0,350	172,31	7265,09	0,04801	0,0920	8,529	353,31
0,40	0,450	211,70	8925,93	0,04755	0,0884	6,660	430,46
0,50	0,550	251,09	10586,76	0,04718	0,0856	5,464	504,26
0,60	0,650	290,49	12247,63	0,04686	0,0834	4,631	575,55
0,70	0,750	329,88	13908,46	0,04658	0,0816	4,019	644,83
0,80	0,850	369,27	15569,33	0,04633	0,0800	3,550	712,49
0,90	0,945	406,69	17147,10	0,04612	0,0709	3,195	697,91
0,99	Ukupan pad tlaka Δp [Pa]						4446,87


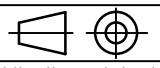

Usporedba pada tlaka za pločasti izmjenjivač- 5.4.1. Han et al. (2003)

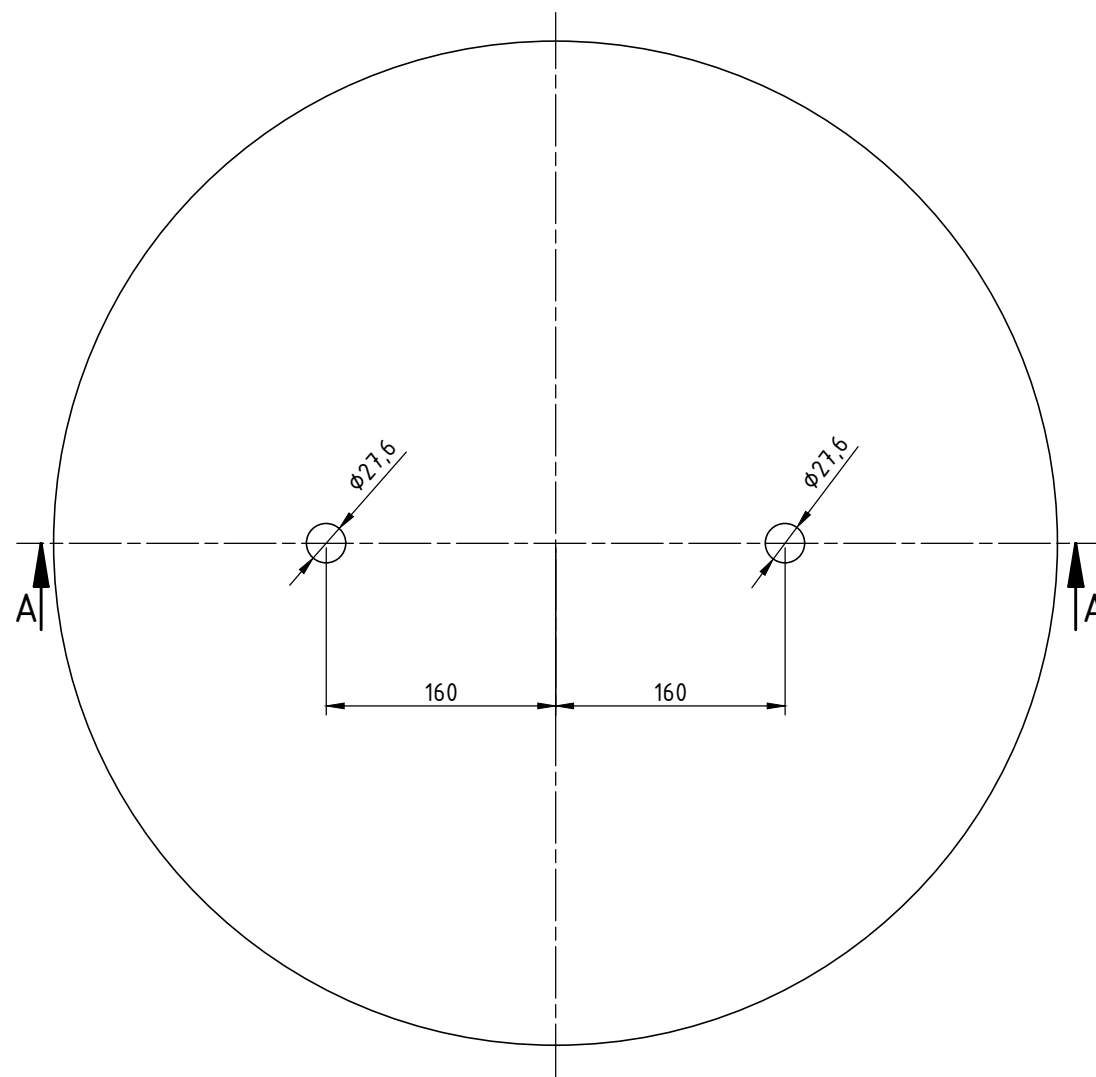
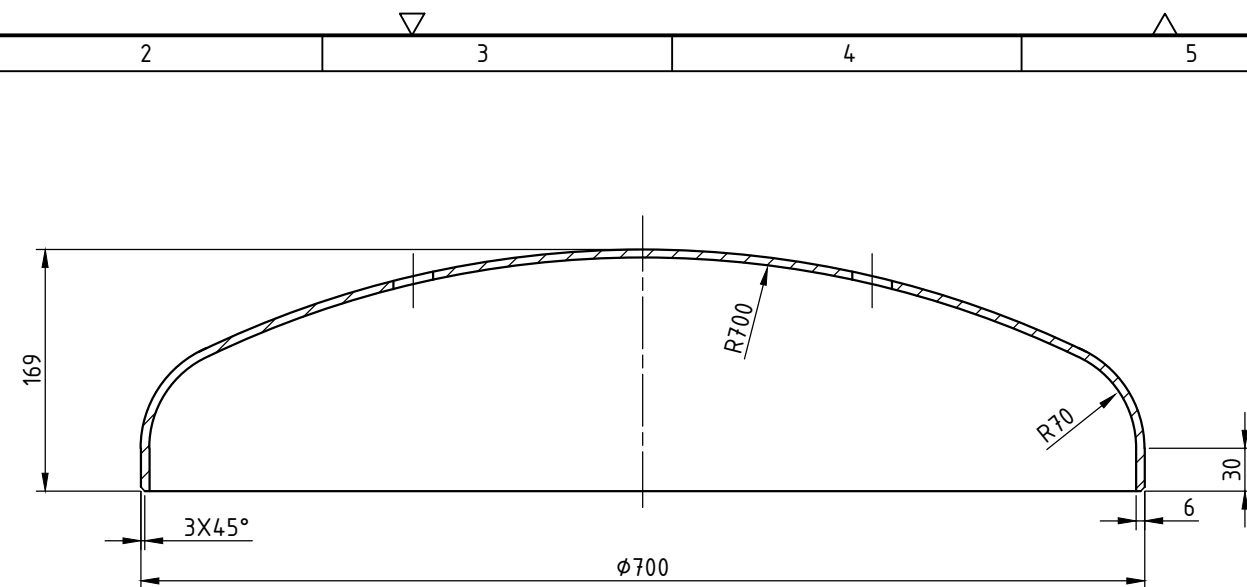
Sadržaj pare	Srednji sadržaj pare	Ekvivalentna masena brzina	Ekvivalentni Reynoldsov broj	Faktor otpora	Udaljenost između dviju koordinata sadržaja pare	Srednja gustoća	Pad taka
x [kg/kg]	\bar{x} [kg/kg]	G_{ekv} [kg/m ² s]	Re_{ekv} [-]	f_{HN} [-]	ΔL [m]	ρ [kg/m ³]	Δp [m]
0,01	0,055	56,11	2365,58	0,08	0,1070	49,434	123,73
0,10	0,150	93,53	3943,39	0,07	0,1049	19,427	246,74
0,20	0,250	132,92	5604,22	0,06	0,0971	11,854	320,68
0,30	0,350	172,31	7265,09	0,05	0,0920	8,529	377,06
0,40	0,450	211,70	8925,93	0,05	0,0884	6,660	423,78
0,50	0,550	251,09	10586,76	0,04	0,0856	5,464	464,33
0,60	0,650	290,49	12247,63	0,04	0,0834	4,631	500,55
0,70	0,750	329,88	13908,46	0,04	0,0816	4,019	533,54
0,80	0,850	369,27	15569,33	0,04	0,0800	3,550	564,03
0,90	0,945	406,69	17147,10	0,04	0,0709	3,195	531,98
0,99	Ukupan pad tlaka Δp [Pa]						4086,42


Usporedba pada tlaka za pločasti izmjenjivač- 5.4.1. Han et al. (2003)

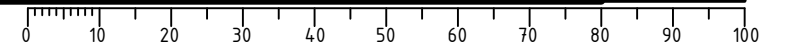
Sadržaj pare	Srednji sadržaj pare	Ekvivalentna masena brzina	Ekvivalentni Reynoldsov broj	Faktor otpora	Udaljenost između dviju koordinata sadržaja pare	Srednja gustoća	Pad taka
x [kg/kg]	\bar{x} [kg/kg]	G_{ekv} [kg/m ² s]	Re_{ekv} [-]	f_{YN} [-]	ΔL [m]	ρ [kg/m ³]	Δp [m]
0,01	0,055	56,11	2365,58	0,1986	0,1070	49,434	293,11
0,10	0,150	93,53	3943,39	0,1243	0,1049	19,427	457,91
0,20	0,250	132,92	5604,22	0,0901	0,0971	11,854	503,14
0,30	0,350	172,31	7265,09	0,0710	0,0920	8,529	522,61
0,40	0,450	211,70	8925,93	0,0588	0,0884	6,660	532,35
0,50	0,550	251,09	10586,76	0,0503	0,0856	5,464	537,63
0,60	0,650	290,49	12247,63	0,0440	0,0834	4,631	540,59
0,70	0,750	329,88	13908,46	0,0392	0,0816	4,019	542,26
0,80	0,850	369,27	15569,33	0,0353	0,0800	3,550	543,17
0,90	0,945	406,69	17147,10	0,0323	0,0709	3,195	489,22
0,99	Ukupan pad tlaka Δp [Pa]						4961,99

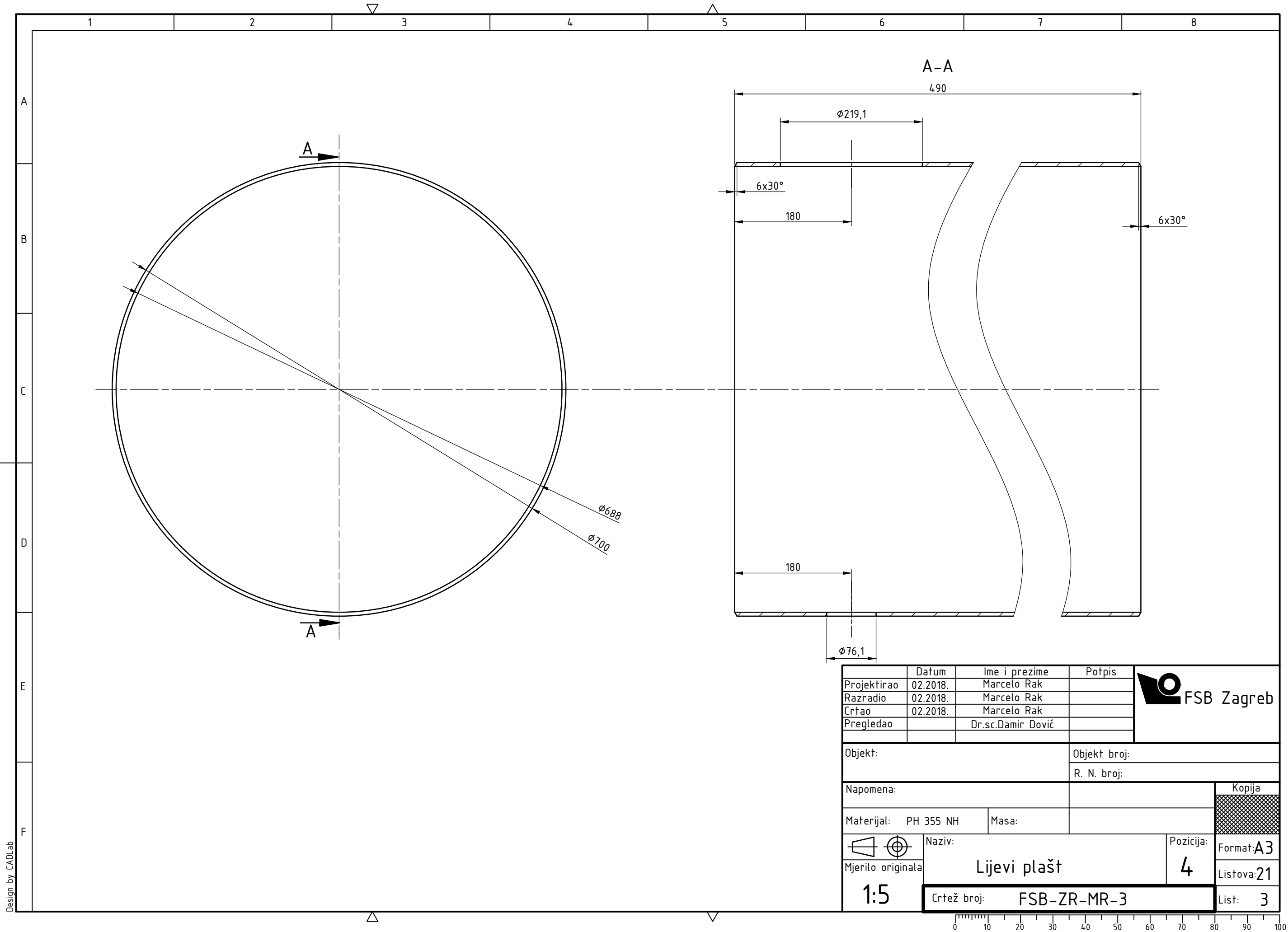


Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Razradio	02.2018.	Marcelo Rak		
Crtao	02.2018.	Marcelo Rak		
Pregledao		Dr.sc.Damir Dović		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				
Materijal: Č 0000		Masa:		
 Mjerilo originala 1:1	Naziv:		Pozicija:	Kopija  Format: A4 Listova: 21 List: 1
	Cijevni priključak DN20		2	
Crtež broj:			FSB-ZR-MR-1	

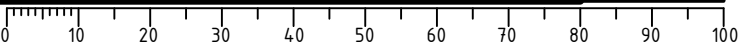


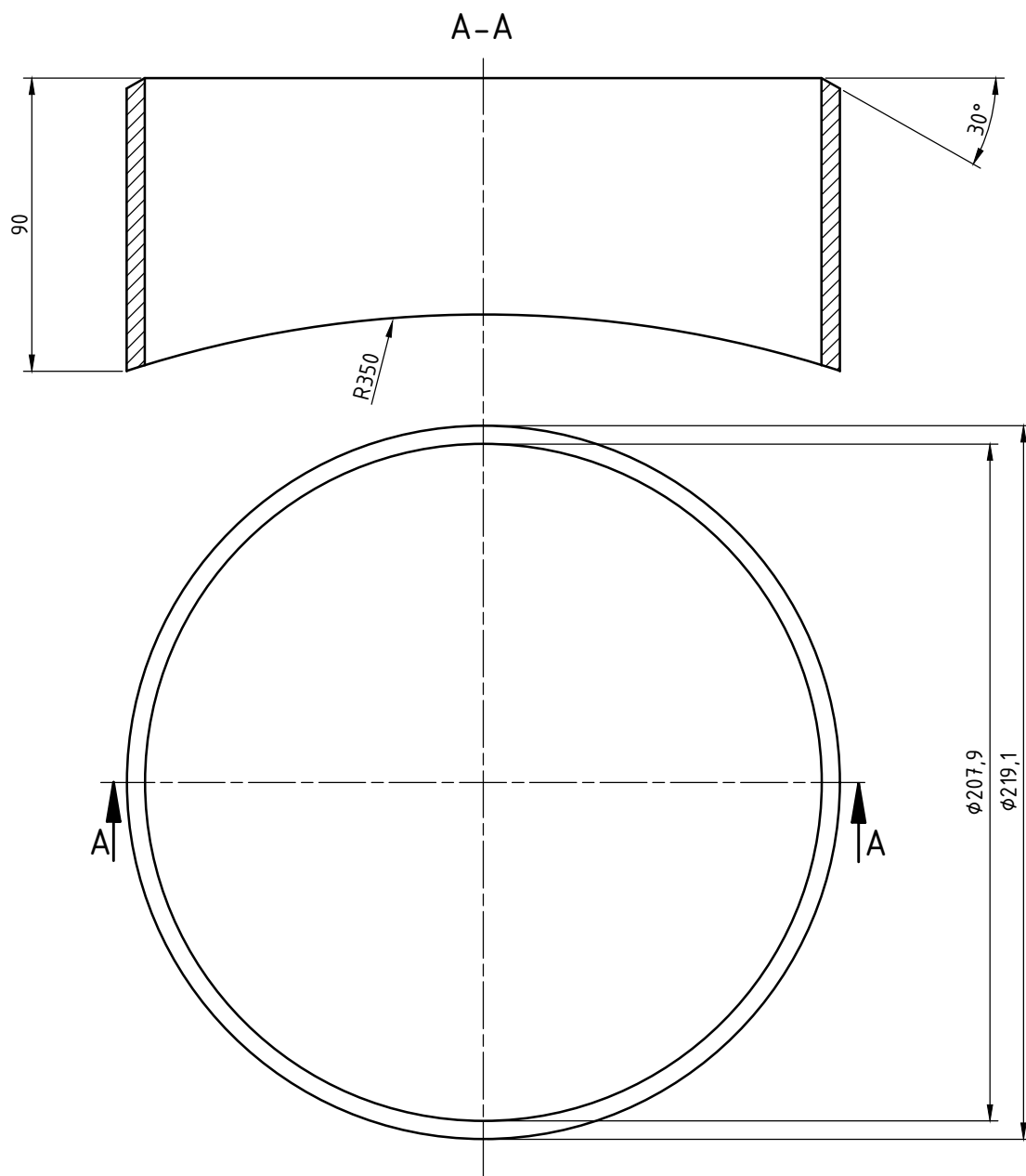
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	02.2018.	Marcelo Rak		
Razradio	02.2018.	Marcelo Rak		
Crtao	02.2018.	Marcelo Rak		
Pregledao		Dr.sc.Damir Dović		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal: PH 355 NH			Masa:	
Naziv:			Pozicija:	
Mjerilo originala				
1:5			Lijeva podnica s izrezima	3
Crtež broj:			FSB-ZR-MR-2	2




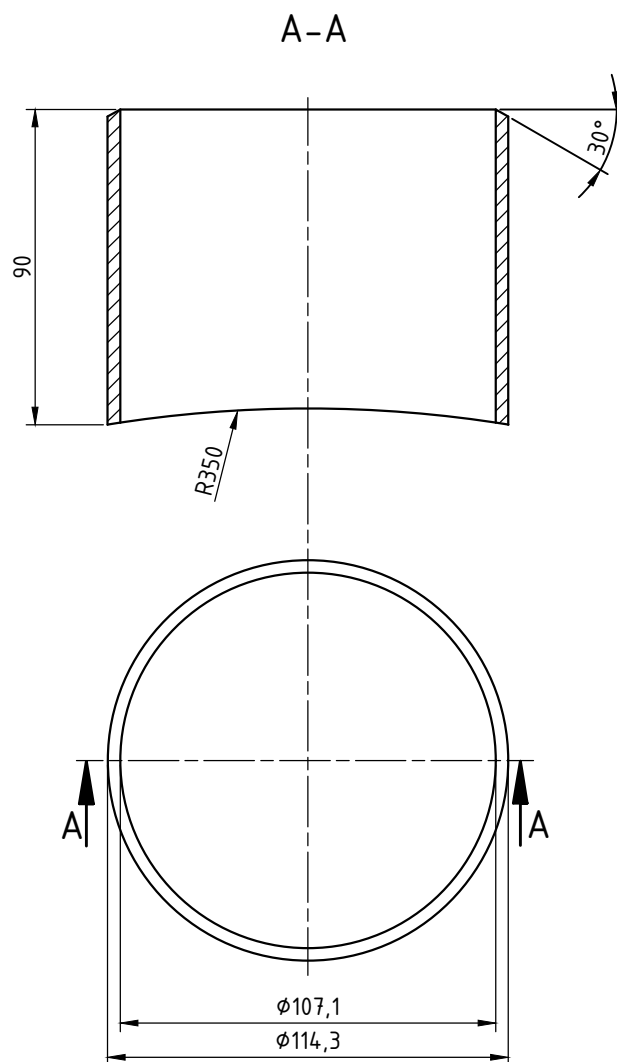



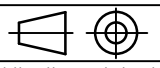
	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	02.2018.	Marcelo Rak		
Razradio	02.2018.	Marcelo Rak		
Crtao	02.2018.	Marcelo Rak		
Pregledao		Dr.sc.Damir Dović		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal: PH 355 NH		Masa:		
	Naziv:		Pozicija:	Format:A3
Mjerilo originala	Lijevi plašt		4	Listova:21
1:5	Crtež broj: FSB-ZR-MR-3			List: 3

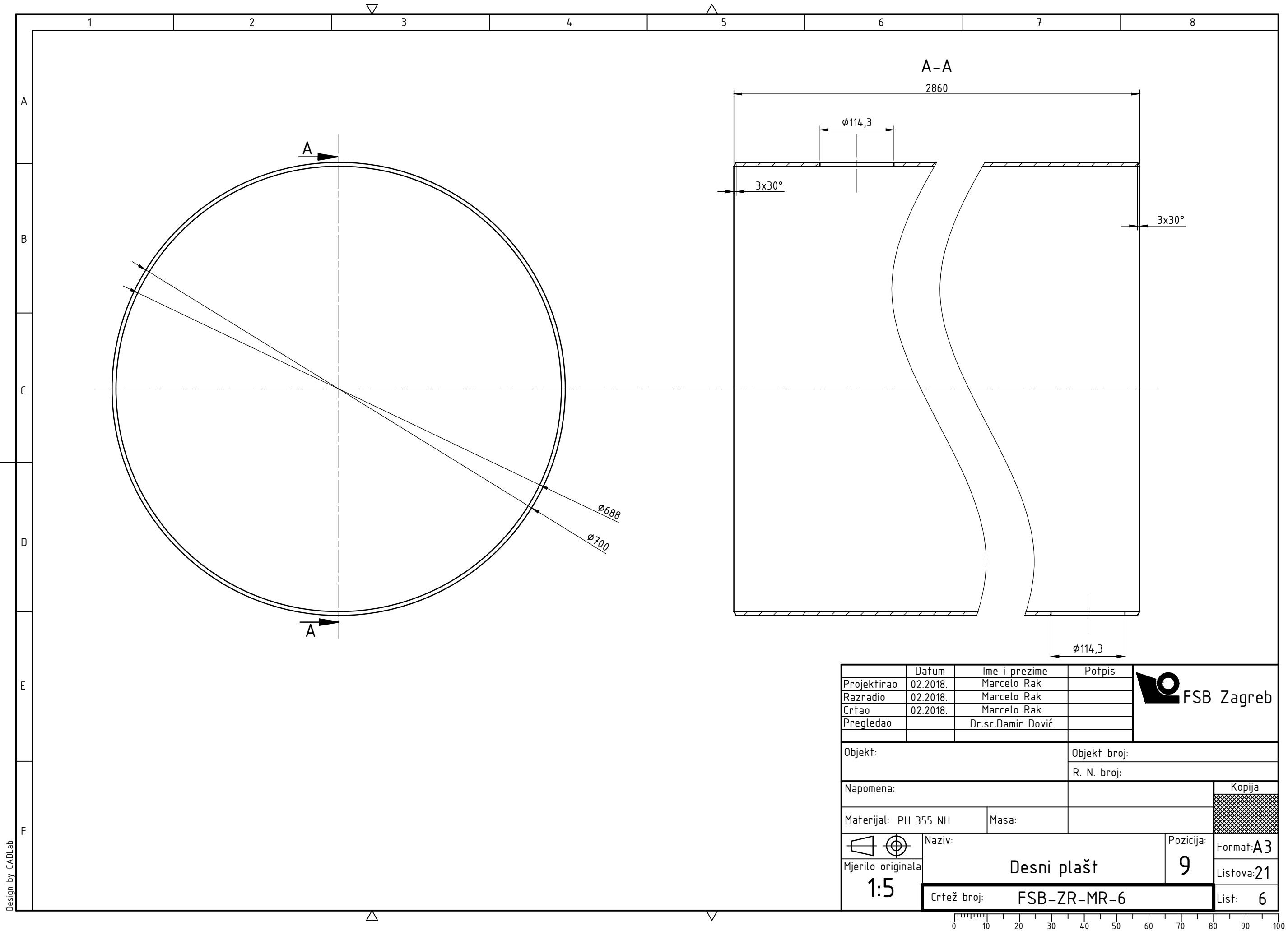




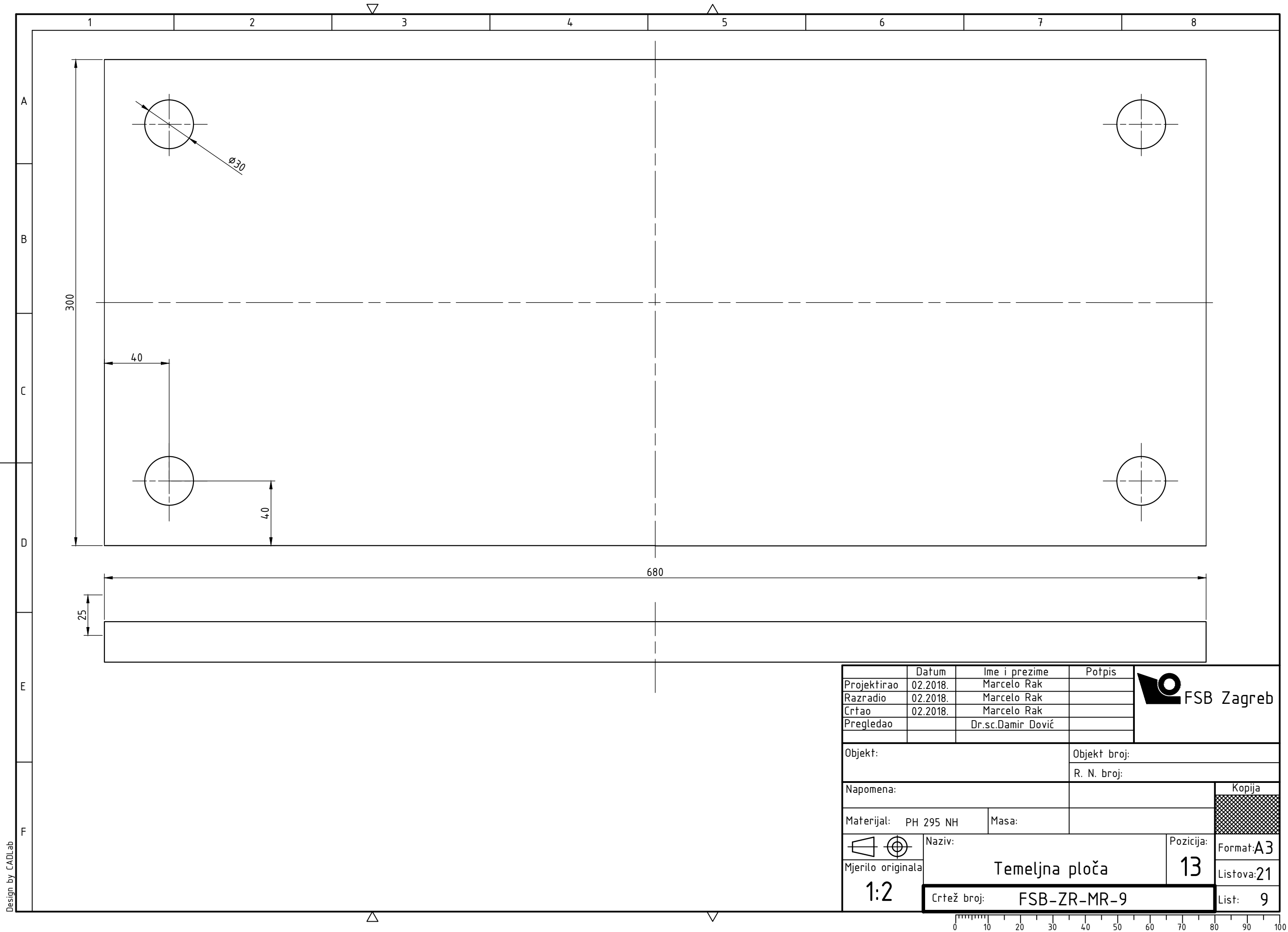
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Razradio	02.2018.	Marcelo Rak		
Crtao	02.2018.	Marcelo Rak		
Pregledao		Dr.sc.Damir Dović		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal: Č 0000		Masa:		
 Mjerilo originala 1:2	Naziv:		Pozicija:	Format: A4 Listova: 21 List: 4
Cijevni priključak DN200		5		
Crtež broj: FSB-ZR-MR-4				

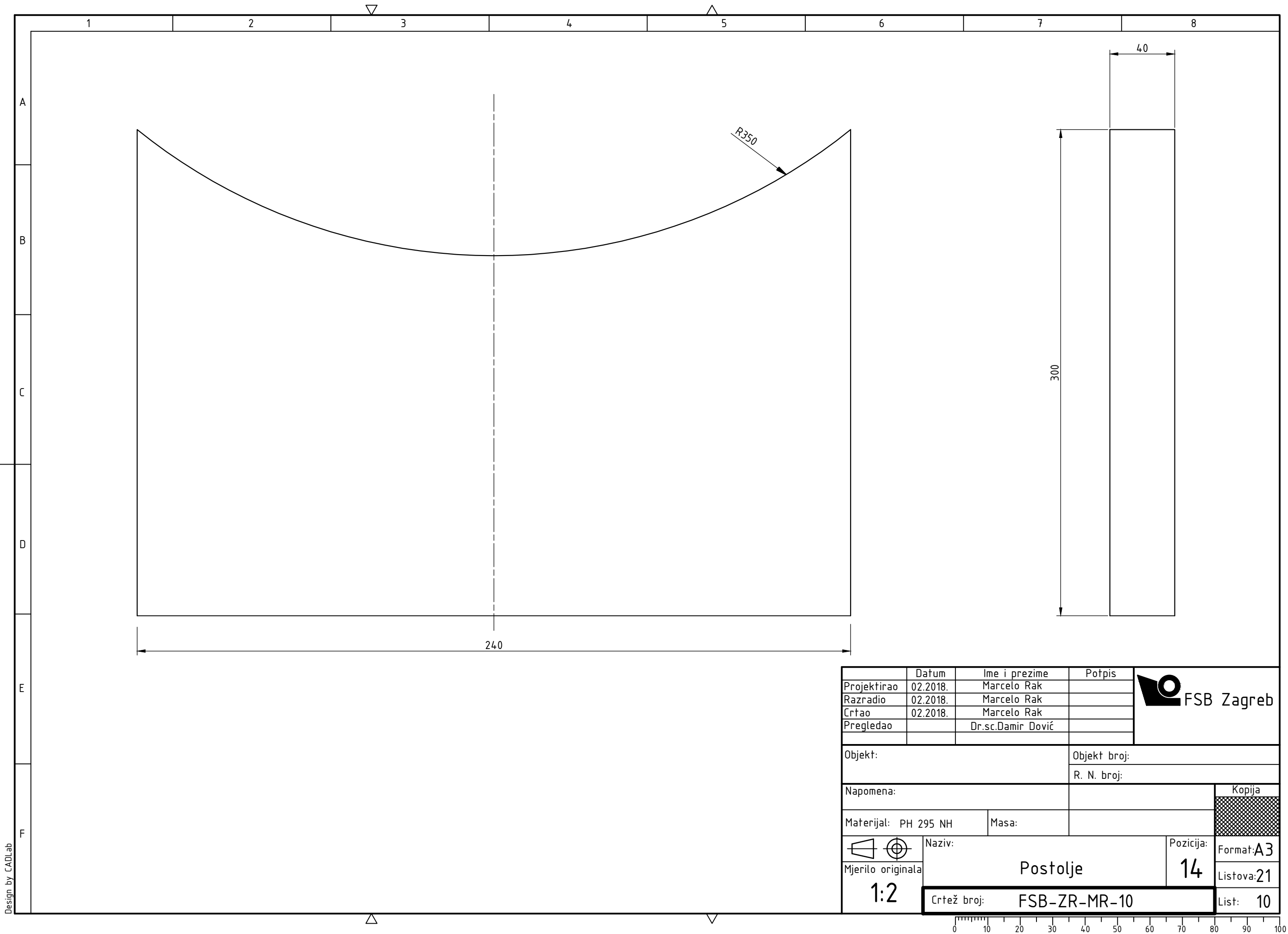



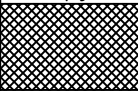
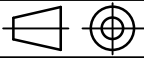
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Razradio	02.2018.	Marcelo Rak		
Crtao	02.2018.	Marcelo Rak		
Pregledao		Dr.sc.Damir Dović		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal: Č 0000		Masa:	<div style="background-color: #cccccc; width: 100px; height: 40px;"></div>	
 Mjerilo originala 1:2	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
		Cijevni priključak D100	7	Listova: 21
		Crtež broj: FSB-ZR-MR-5	List: 5	

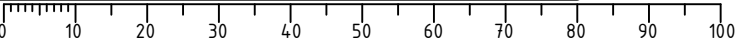


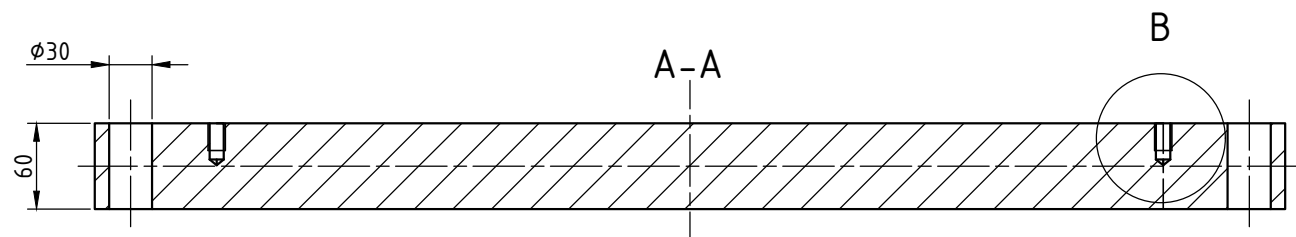
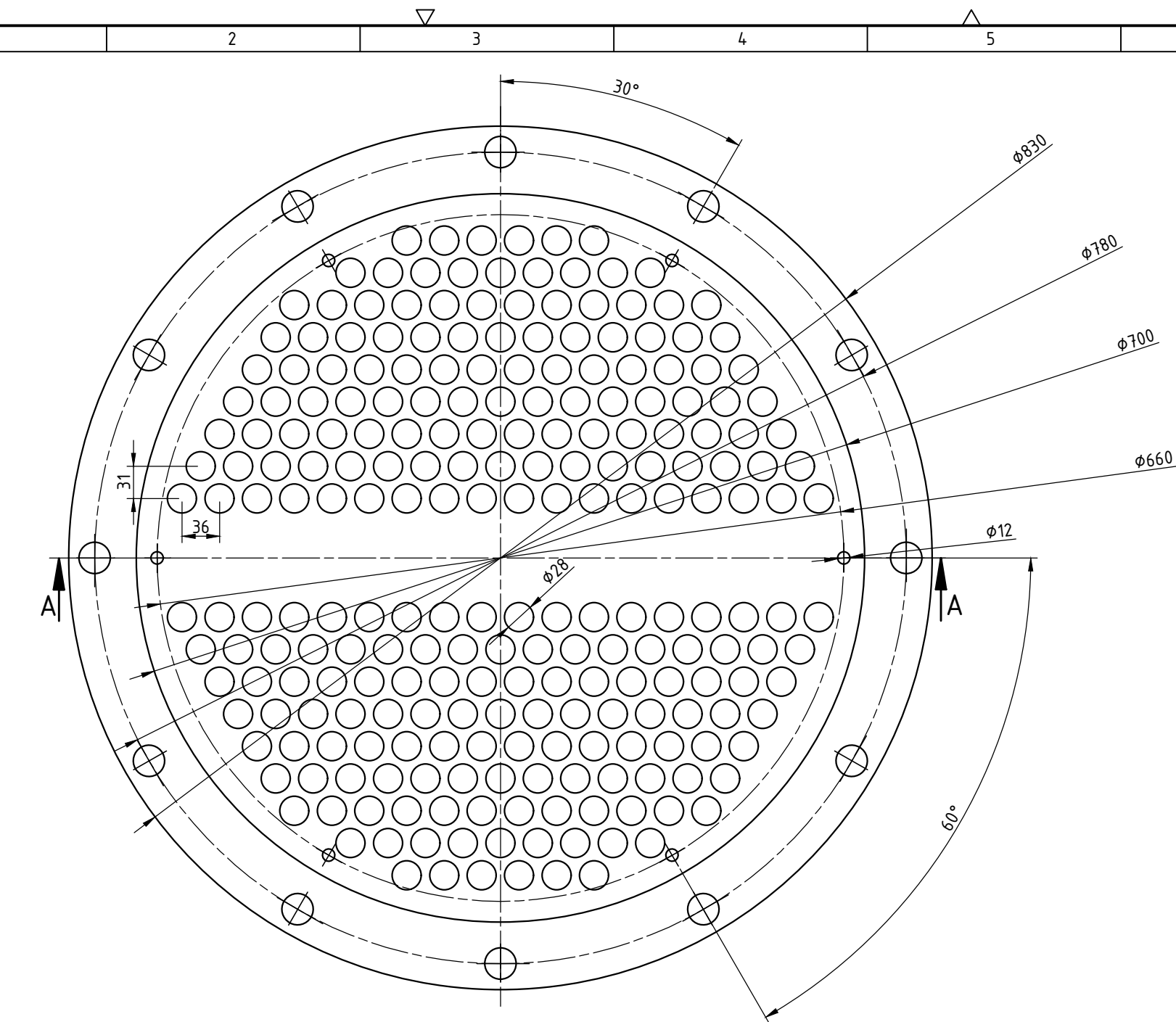
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	02.2018.	Marcelo Rak		
Razradio	02.2018.	Marcelo Rak		
Crtao	02.2018.	Marcelo Rak		
Pregledao		Dr.sc.Damir Dović		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal: PH 355 NH		Masa:		
 	Naziv:		Pozicija:	Format:A3
Mjerilo originala	Desni plašt		9	Listova:21
1:5	Crtež broj: FSB-ZR-MR-6			List: 6



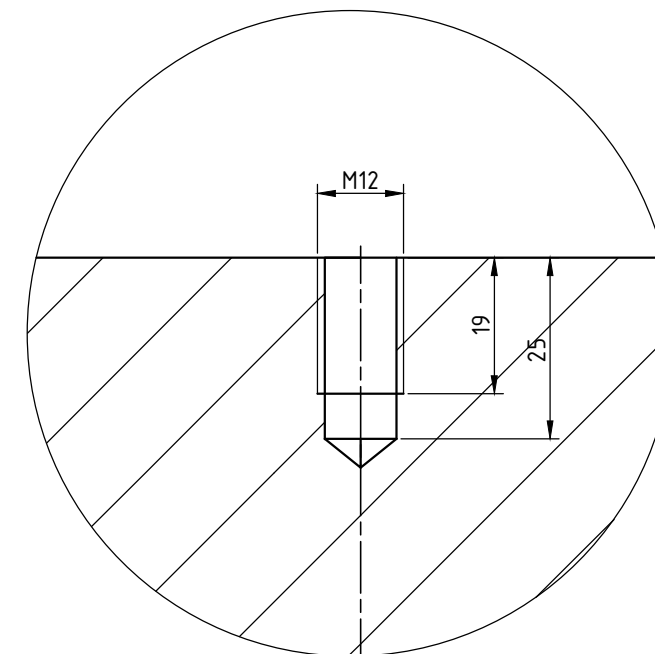


	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	02.2018.	Marcelo Rak		
Razradio	02.2018.	Marcelo Rak		
Crtao	02.2018.	Marcelo Rak		
Pregledao		Dr.sc.Damir Dović		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
				
Materijal: PH 295 NH		Masa:		
	Naziv:		Pozicija:	Format:A3
Mjerilo originala	Postolje		14	Listova:21
1:2	Crtež broj: FSB-ZR-MR-10			List: 10

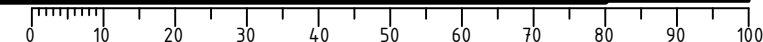


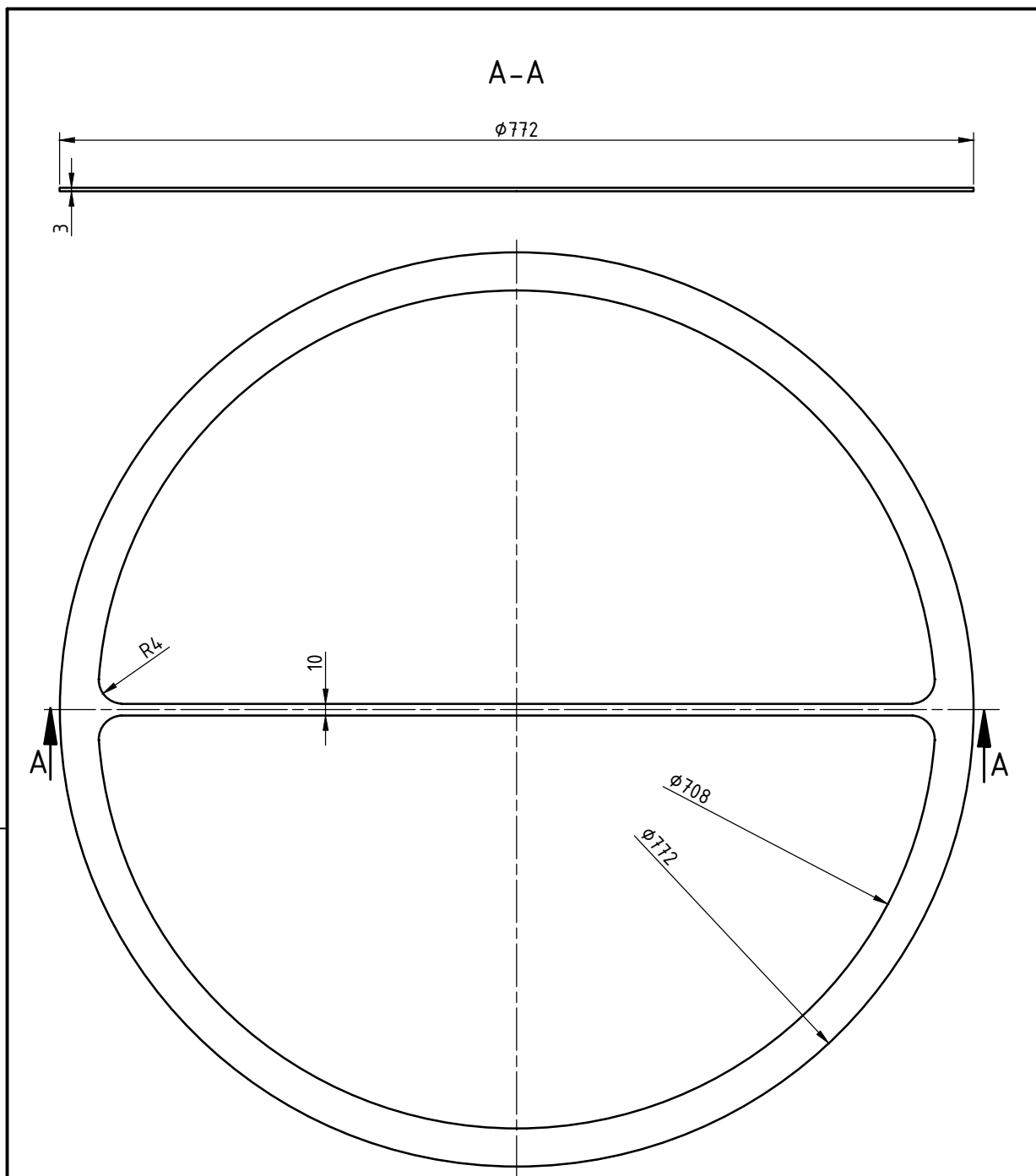



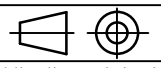

B
(M 1:1)

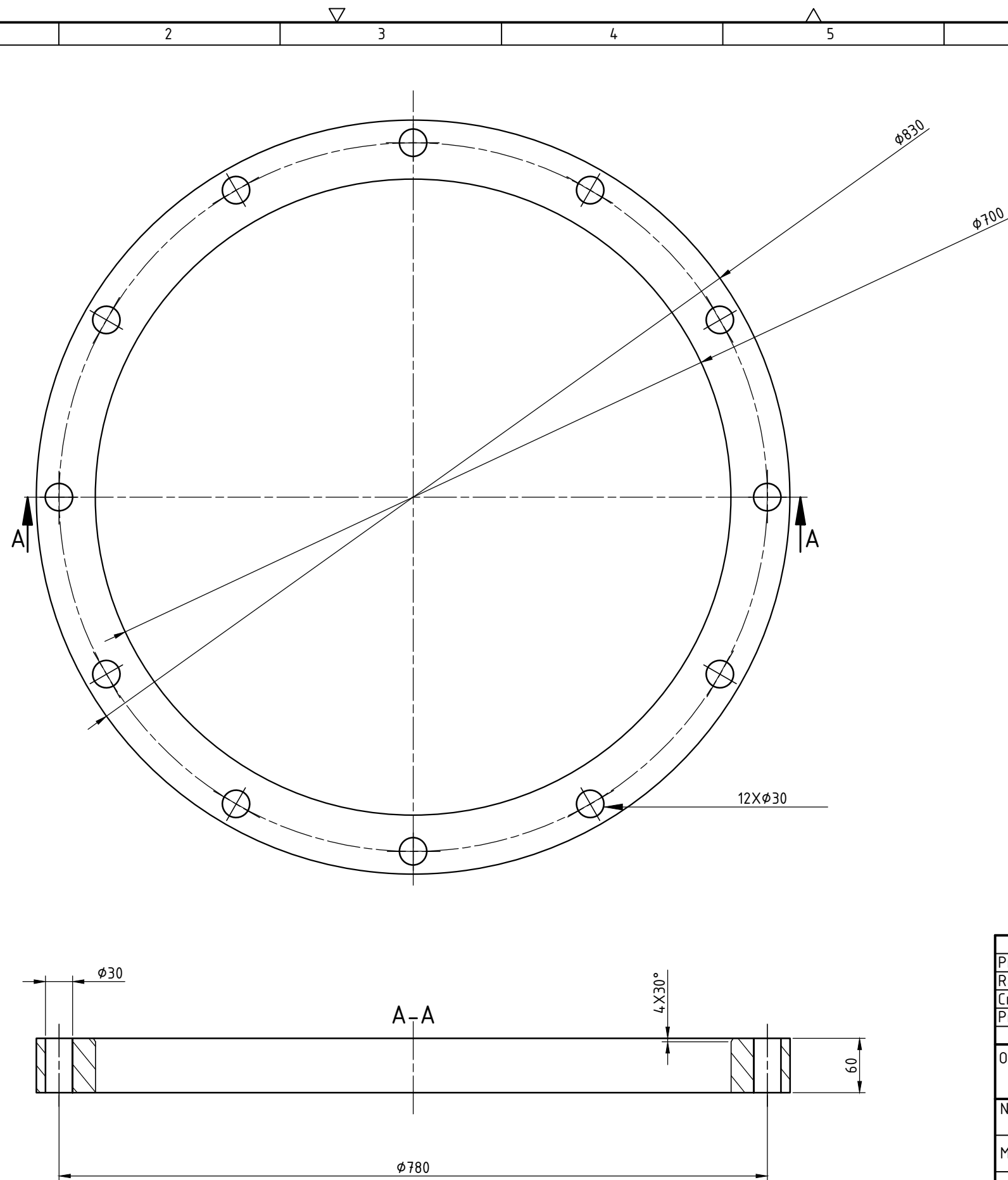



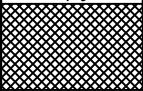
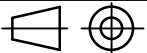
	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	02.2018.	Marcelo Rak		
Razradio	02.2018.	Marcelo Rak		
Crtao	02.2018.	Marcelo Rak		
Pregledao		Dr.sc.Damir Dović		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal: PH 355 NH		Masa:		
	Naziv:		Pozicija:	Format: A3
	Cijevna stijenka s uvrtima		17	Listova: 21
Mjerilo originala	Crtež broj:		List: 11	
1:5	FSB-ZR-MR-11			

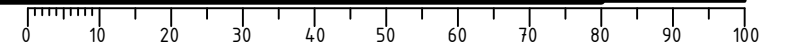


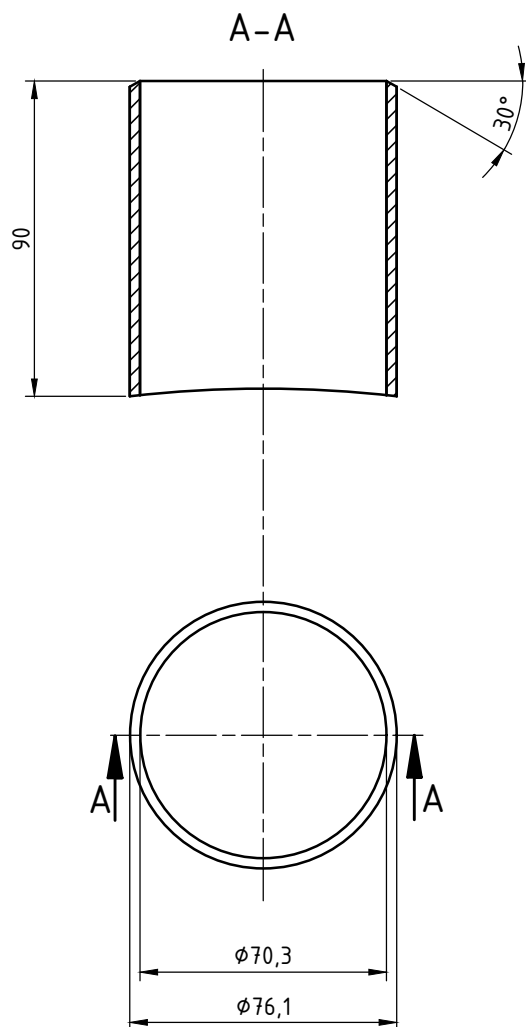



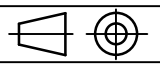
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Razradio	02.2018.	Marcelo Rak		
Crtao	02.2018.	Marcelo Rak		
Pregledao		Dr.sc.Damir Dović		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				
Materijal: klingerit		Masa:		
 Naziv:		Pozicija:		Kopija 
Mjerilo originala 1:5		Brtva podnice 18		
Crtež broj: FSB-ZR-MR-12			List: 12	

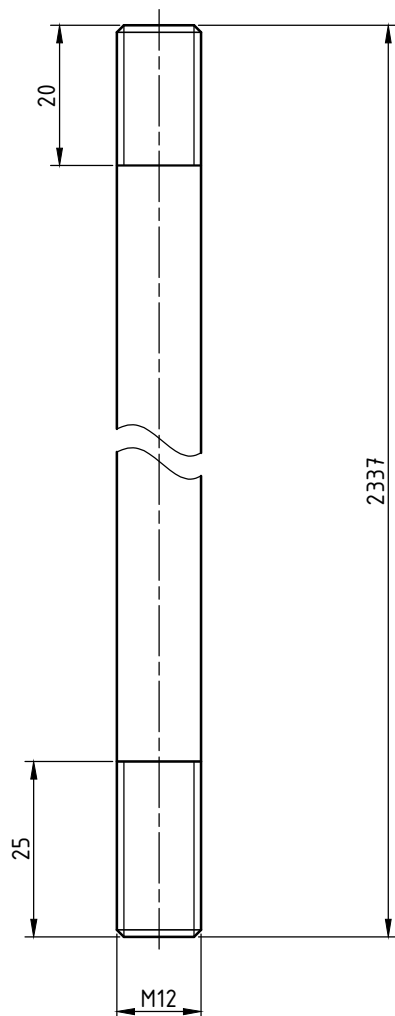



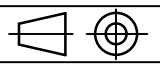
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
Projektirao	02.2018.	Marcelo Rak			
Razradio	02.2018.	Marcelo Rak			
Crtao	02.2018.	Marcelo Rak			
Pregledao		Dr.sc.Damir Dović			
Objekt:			Objekt broj:		
			R. N. broj:		
Napomena:					Kopija
					
Materijal:	PH 355 NH	Masa:			
	Naziv:		Pozicija:	Format: A3	
Mjerilo originala	Prirubnica DN700		20	Listova: 21	
1:5	Crtež broj: FSB-ZR-MR-13			List: 13	

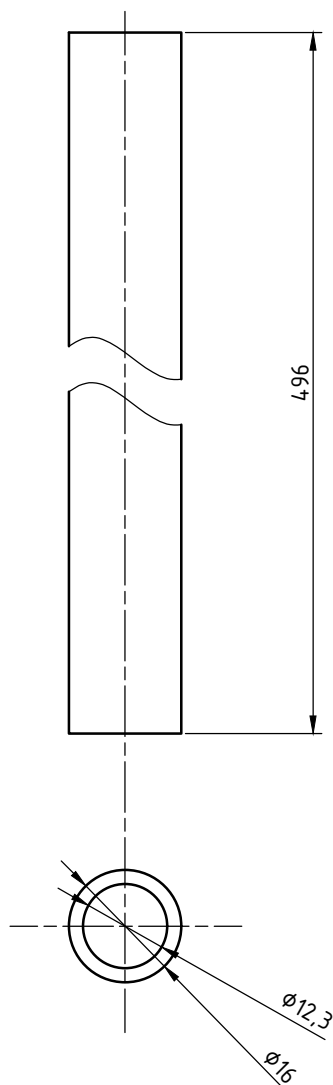




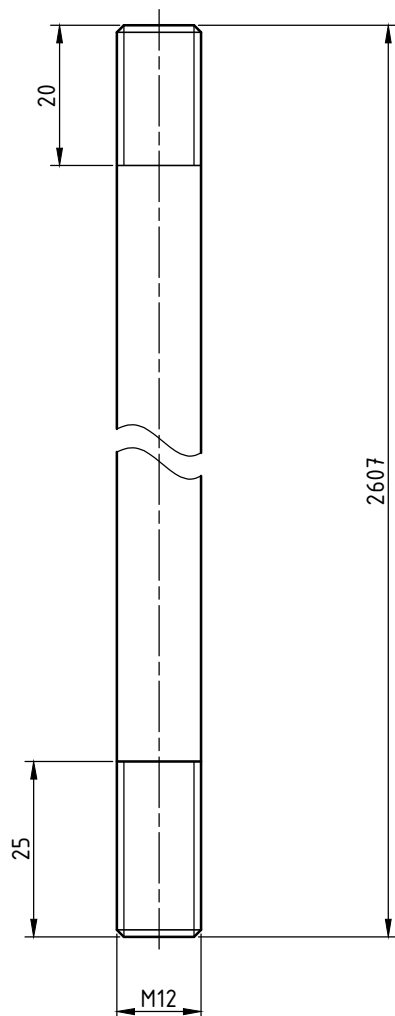
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Razradio	02.2018.	Marcelo Rak		
Crtao	02.2018.	Marcelo Rak		
Pregledao		Dr.sc.Damir Dović		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal: Č 0000		Masa:		
 Mjerilo originala 1:2	Naziv:		Pozicija:	Format: A4 Listova: 21 List: 14
	Cijevni priključak DN65 Crtež broj: FSB-ZR-MR-14		21	


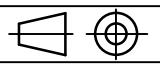


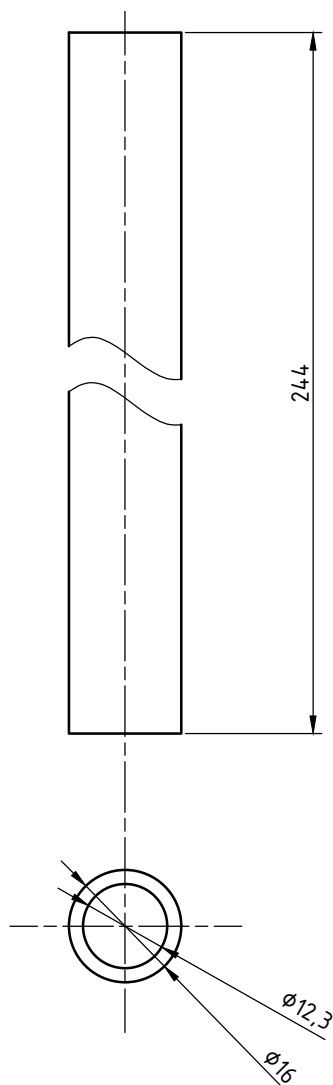
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Razradio	02.2018.	Marcelo Rak		
Crtao	02.2018.	Marcelo Rak		
Pregledao		Dr.sc.Damir Dović		
Objekt:		Objekt broj:		
		R. N. broj:		
Napomena:				Kopija
Materijal: PH 295 NH		Masa:		
 Mjerilo originala	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
1:1	Potporna šipka 2337 mm		23	Listova: 21
		Crtež broj:	FSB-ZR-MR-15	List: 15



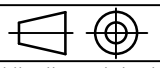


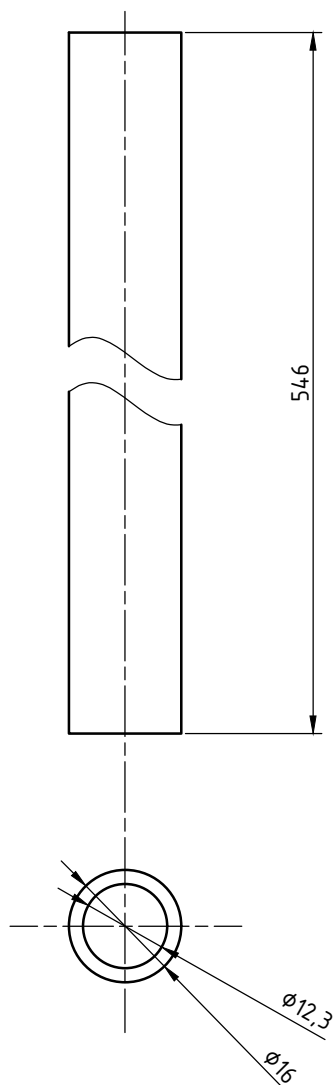
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Razradio	02.2018.	Marcelo Rak		
Crtao	02.2018.	Marcelo Rak		
Pregledao		Dr.sc.Damir Dović		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal: PH 295 NH		Masa:	<div style="background-color: #cccccc; width: 100px; height: 40px;"></div>	
 Mjerilo originala 1:1	Naziv: Držać razmaka 496 mm		Pozicija: 24	Format: A4 Listova: 21
Crtež broj: FSB-ZR-MR-16			List: 16	



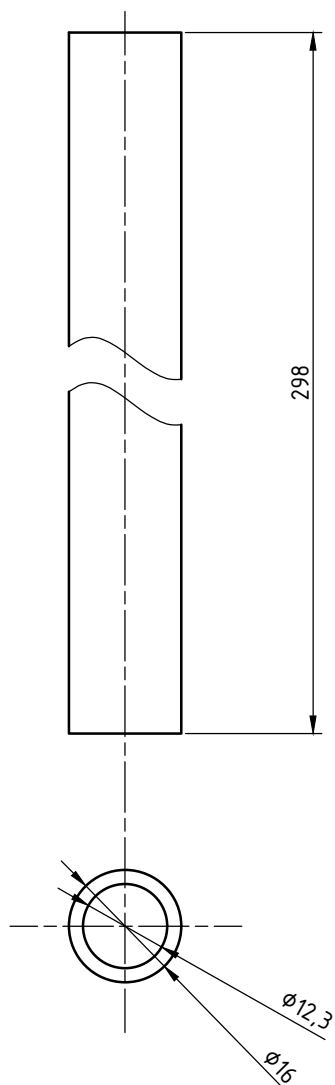
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Razradio	02.2018.	Marcelo Rak		
Crtao	02.2018.	Marcelo Rak		
Pregledao		Dr.sc.Damir Dović		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal: PH 295 NH		Masa:		
 Mjerilo originala 1:1	Naziv: Potporna šipka 2587 mm		Pozicija: 25	Format: A4 Listova: 21 List: 17
Crtež broj: FSB-ZR-MR-17				

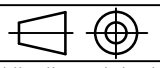


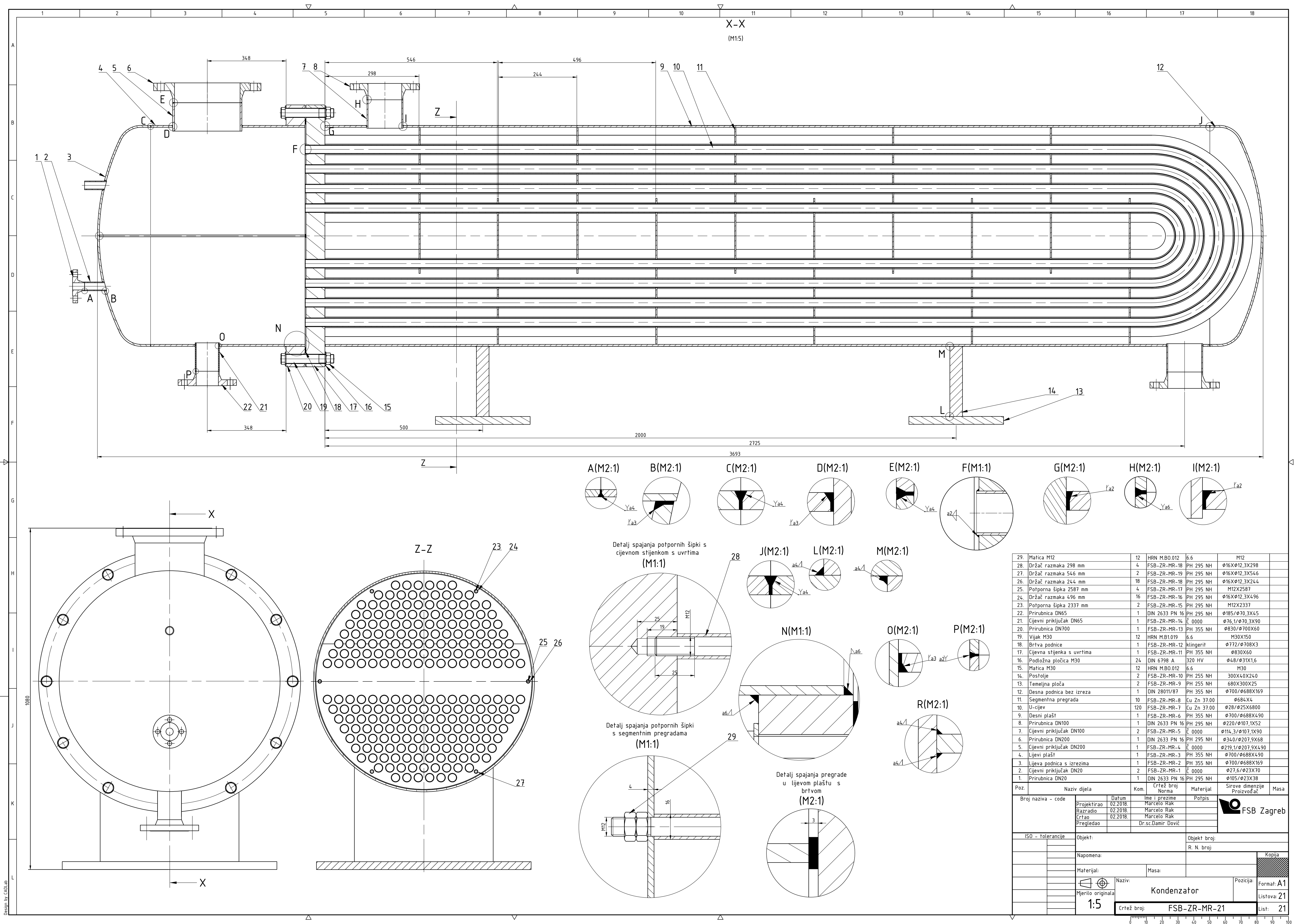
Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Razradio	02.2018.	Marcelo Rak		
Crtao	02.2018.	Marcelo Rak		
Pregledao		Dr.sc.Damir Dović		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal: PH 295 NH		Masa:		
 Mjerilo originala 1:1	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
	Držać razmaka 244 mm		26	Listova: 21
Crtež broj: FSB-ZR-MR-18			List: 18	



Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Razradio	02.2018.	Marcelo Rak		
Crtao	02.2018.	Marcelo Rak		
Pregledao		Dr.sc.Damir Dović		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal: PH 295 NH		Masa:		
 Mjerilo originala 1:1	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
	Držač razmaka 546 mm		27	Listova: 21
Crtež broj: FSB-ZR-MR-19			List: 19	



Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Razradio	02.2018.	Marcelo Rak		
Crtao	02.2018.	Marcelo Rak		
Pregledao		Dr.sc.Damir Dović		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal: PH 295 NH		Masa:	<div style="background-color: #cccccc; width: 100px; height: 40px;"></div>	
 Mjerilo originala 1:1	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
	Držač razmaka 298 mm		28	Listova: 21
Crtež broj: FSB-ZR-MR-20			List: 20	



29. Matica M12	12	HRN M.B0.012	6.6	M12	
28. Držač razmaka 298 mm	4	FSB-ZR-MR-18	PH 295 NH	Ø16XØ12,3X298	
27. Držač razmaka 546 mm	2	FSB-ZR-MR-19	PH 295 NH	Ø16XØ12,3X546	
26. Držač razmaka 244 mm	18	FSB-ZR-MR-18	PH 295 NH	Ø16XØ12,3X244	
25. Potporna šipka 2587 mm	4	FSB-ZR-MR-17	PH 295 NH	M12X2587	
24. Držač razmaka 496 mm	16	FSB-ZR-MR-16	PH 295 NH	Ø16XØ12,3X496	
23. Potporna šipka 2337 mm	2	FSB-ZR-MR-15	PH 295 NH	M12X2337	
22. Priрубica DN65	1	DIN 2633 PN 16	PH 295 NH	Ø185/Ø70,3X45	
21. Cijevni priključak DN65	1	FSB-ZR-MR-14	Č 0000	Ø76,1/Ø70,3X90	
20. Priрубica DN700	1	FSB-ZR-MR-13	PH 355 NH	Ø830/Ø700X60	
19. Vijak M30	12	HRN M.B1.019	6.6	M30X150	
18. Brtva podnice	1	FSB-ZR-MR-12	klingerit	Ø772/Ø708X3	
17. Cijevna stijenka s uvrtima	1	FSB-ZR-MR-11	PH 355 NH	Ø830X60	
16. Podložna pločica M30	24	DIN 6798 A	320 HV	Ø48/Ø31X1,6	
15. Matica M30	12	HRN M.B0.012	6.6	M30	
14. Postolje	2	FSB-ZR-MR-10	PH 255 NH	300X400X240	
13. Temeljna ploča	2	FSB-ZR-MR-9	PH 255 NH	680X300X25	
12. Desna podnica bez izreza	1	DIN 28011/87	PH 355 NH	Ø700/Ø688X169	
11. Segmentna pregrada	10	FSB-ZR-MR-8	Cu Zn 37.00	Ø684X4	
10. U-cijev	120	FSB-ZR-MR-7	Cu Zn 37.00	Ø28/Ø25X6800	
9. Desni plašt	1	FSB-ZR-MR-6	PH 355 NH	Ø700/Ø688X490	
8. Priрубica DN100	1	DIN 2633 PN 16	PH 295 NH	Ø220/Ø107,1X52	
7. Cijevni priključak DN100	2	FSB-ZR-MR-5	Č 0000	Ø114,3/Ø107,1X90	
6. Priрубica DN200	1	DIN 2633 PN 16	PH 295 NH	Ø340/Ø207,9X68	
5. Cijevni priključak DN200	1	FSB-ZR-MR-4	Č 0000	Ø219,1/Ø207,9X490	
4. Lijevi plašt	1	FSB-ZR-MR-3	PH 355 NH	Ø700/Ø688X490	
3. Lijeva podnica s izrezima	1	FSB-ZR-MR-2	PH 355 NH	Ø700/Ø688X169	
2. Cijevni priključak DN20	2	FSB-ZR-MR-1	Č 0000	Ø27,6/Ø23X70	
1. Priрубica DN20	1	DIN 2633 PN 16	PH 295 NH	Ø105/Ø23X38	

Poz.	Naziv dijela		Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime		Potpis	 FSB Zagreb	
		02.2018.	Marcelo Rak				
		02.2018.	Marcelo Rak				
		02.2018.	Marcelo Rak				
			Dr.sc.Damir Davić				
ISO - tolerancije		Objekt:				Objekt broj:	
						R. N. broj:	
Napomena:						Kopija	
Materijal:		Masa:					